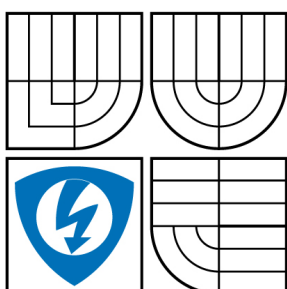


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

MODULY PRO ÚPRAVU SIGNÁLU

DATA ACQUISITION MODULES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

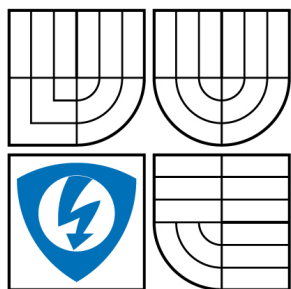
ZDENĚK ŠTREIT

VEDOUcí PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. PETR BENEŠ, Ph.D.

BRNO 2008



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav automatizace a měřicí
techniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor

Automatizační a měřicí technika

Student: Štreit Zdeněk

ID: 74614

Ročník: 3

Akademický rok: 2007/2008

NÁZEV TÉMATU:

Moduly pro úpravu signálu

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s problematikou úpravy signálu z odporových snímačů teploty - linearizace, kompenzace odporu přírodních vodičů, galvanické oddělení atd. Navrhněte, realizujte a proměřte jednoduchý modul pro úpravu signálu s těmito parametry:

- vstup ze snímače PT100
- rozsah měřených teplot -50 až +200 °C
- výstupní napětí 0-5 V
- napájení 24 V

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Termín zadání: 1.2.2008

Termín odevzdání: 2.6.2008

Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D.

prof. Ing. Pavel Jura, CSc.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav automatizace a měřicí techniky

Moduly pro úpravu signálu

Bakalářská práce

Zaměření studia: Automatizační a měřicí technika

Student: Zdeněk Štreit

Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D.

Abstrakt:

Bakalářská práce se zabývá návrhem, realizací a praktickým měřením přesnosti převodníku teploty s galvanickým oddělením pro platinový snímač Pt 100.

V její úvodní části jsou popsány typy čidel pro odporové měření teploty, jejich rozdělení a charakteristické vlastnosti, přičemž důraz je kladen na platinové odporové snímače teploty.

Další část bakalářské práce popisuje způsoby zapojení platinového snímače do měřicího obvodu a vyhodnocení tohoto signálu. Jsou zde obsaženy možnosti dalšího zpracování měřeného signálu pomocí různých zapojení operačních zesilovačů nebo použitím specializovaných obvodů. Řeší se zde problémy při vyhodnocování signálů z platinového snímače, jako je kompenzace odporu přívodních vodičů a linearizace průběhu platinového čidla. Další kapitola nás seznámí s důvody galvanického oddělení v měřicím řetězci a jeho principem. Jsou zde uvedeny elektronické součástky a obvody, které zajišťují galvanické oddělení.

Závěrečná část bakalářské práce je věnována praktickému návrhu obvodového řešení převodníku pro platinový snímač s galvanickým oddělením. Je zde popsán návrh zapojení vstupní části převodníku, možnost linearizace čidla Pt 100 a galvanické oddělení pomocí lineárního optočlenu. Převodník byl změřen za různých okolních

teplot a výsledky měření byly zpracovány do tabulek a grafů, které jsou součástí přílohy bakalářské práce.

Cíl bakalářské práce byl splněn, podařilo se realizovat převodník teploty dle zadání. Zhoršenou přesnost výstupního napětí, při teplotě vyšší nebo nižší než $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$, lze odstranit použitím rezistorů s nižším teplotním koeficientem v měřícím můstku.

Klíčová slova:

měření teploty, odporový snímač teploty, platinový snímač, linearizace výstupu, můstkové zapojení, galvanické oddělení, lineární optočlen

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Faculty of Electrical Engineering and Communication

Department of Control and Instrumentation

Data acquisition modules

Bachelor's thesis

Specialisation of study: Control, Measurement and Instrumentation

Student: Zdeněk Štreit

Supervisor: doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D.

Abstract:

This bachelor's study focuses on design, realization and practical measurement of galvanic isolation temperature transmitter's accuracy for the Pt 100 platinum resistance temperature detector.

The beginning of the study describes the kinds of sensors for resistance temperature measurement, their division and characteristics, whereby the stress is put on platinum resistance temperature detectors.

The other part of this bachelor's study depicts methods of connecting the platinum detector to a measuring circuit and evaluation of such a signal. It contains options of further processing of the measured signal using either various connections of operating amplifiers or specialised circuits. Issues with evaluation of the platinum detector's signals as compensation of an input conductors' resistance and linearization of a platinum detector's course are solved. The following chapter introduces causes of galvanic isolation in a measurement chain and its principle. Electronic components and circuits that ensure the galvanic isolation are also discussed.

The final part of this bachelor's study is devoted to my practical proposal of a circuit solution for the platinum detector's with galvanic isolation transmitter. It describes my proposed design of the transmitter's input part, possibility of the Pt 100

detector's linearization and galvanic isolation using a linear optocoupler. The transmitter was measured at several surrounding temperatures and the results were processed into tables and charts that are presented in an appendix to this study.

This bachelor's study goal was met as I have managed to produce the temperature transmitter according to the request. The worsened accuracy of the output voltage at temperatures lower or higher than $+20^{\circ}\text{C}$ can be eliminated by using resistors with lower temperature coefficient in a measurement bridge.

Key words:

temperature measurement, resistance temperature detector, platinum detector, output linearization, bridge circuit, galvanic isolation, linear optocoupler

Bibliografická citace

ŠTREIT, Z. *Moduly pro úpravu signálu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 64 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D.

P r o h l á š e n í

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma "Moduly pro úpravu signálu" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.“

V Brně dne:

Podpis:

P o d ě k o v á n í

Děkuji tímto doc. Ing. Petru Benešovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce.

V Brně dne:

Podpis:

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ	11
SEZNAM TABULEK	13
SEZNAM ZKRATEK.....	14
1. ÚVOD	15
2. VSTUPNÍ ČLEN ODPOROVÉHO SNÍMAČE TEPLoty	16
2.1 Rozdělení odporových teplotních snímačů [1] [2].....	16
2.1.1 Platinový odporový teplotní snímač	18
2.1.2 Niklový odporový teplotní snímač	21
2.1.3 Měděné odporové snímače teploty	21
2.1.4 Polovodičové snímače teploty	21
2.1.5 Monolitické senzory teploty	22
2.2 Zapojení teplotních čidel v obvodu.....	22
2.2.1 Wheatstoneův můstek [7]	23
2.2.2 Praktické zapojení vstupního obvodu	27
3. LINEARIZACE.....	29
3.1 Teoretický úvod	29
3.2 Příklady zapojení	29
3.3 Speciální obvody.....	30
4. GALVANICKÉ ODDĚLENÍ.....	33
4.1 Důvod galvanického oddělení.....	33
4.2 Způsob galvanického oddělení.....	34
5. NÁVRH ZAPOJENÍ.....	40
5.1 Návrh vstupního měřicího obvodu.....	41
5.2 Výpočet parametrů galvanického oddělení.....	43
5.3 Návrh linearizace	47
6. MĚŘENÍ.....	49
6.1 Výsledky měření	49
7. ZÁVĚR.....	50
8. SEZNAM LITERATURY	51

PŘÍLOHA A	54
A.1: Tabulky naměřených hodnot.....	54
A.2: Graf naměřených hodnot.....	58
PŘÍLOHA B	60
B.1: Dokumentace k plošnému spoji převodníku	60
PŘÍLOHA C	64
C.1: Poznámky	64

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Teplotní závislost odporových snímačů teploty	17
Obr. 2: Různé provedení teplotních čidel Pt 100	18
Obr. 3: Dovolené tolerance průmyslových snímačů Pt dle IEC 741	19
Obr. 4: Závislost odporu čidla Pt 100 na teplotě [1]	20
Obr. 5: Nelinearita čidla Pt 100 [1]	20
Obr. 6: Zapojení čidla Pt 100	23
Obr. 7: Základní můstkové zapojení	24
Obr. 8: Můstek s jedním proměnlivým prvkem	24
Obr. 9: Dvouvodičové zapojení	25
Obr. 10: Třívodičové zapojení	25
Obr. 11: Třívodičové jiné zapojení	26
Obr. 12: Čtyřvodičové zapojení	26
Obr. 13: Čtyřvodičové jiné zapojení	27
Obr. 14: Diferenční zesilovač	27
Obr. 15: Zapojení s přístrojovým zesilovačem	28
Obr. 16: Linearizace čidla Pt 100	29
Obr. 17: Linearizace pomocí operačního zesilovače MAX4236	30
Obr. 18: Zapojení MAX1452	30
Obr. 19: Zapojení MAX197	31
Obr. 20: Třívodičové zapojení XTR105	32
Obr. 21: Měřicí čidlo a zemní smyčka [20]	33
Obr. 22: Způsoby realizace galvanického oddělení [20]	34
Obr. 23: Vnitřní zapojení digitálního oddělovače ISO721	35
Obr. 24: Vnitřní zapojení AD202	36
Obr. 25: Vnitřní zapojení AD210	36
Obr. 26: Vnitřní zapojení ISO130	37
Obr. 27: Vnitřní zapojení ISO107	37
Obr. 28: Vnitřní zapojení ISO100	38
Obr. 29: Optočlen zapojen ve fotovoltaickém režimu [31]	39

Obr. 30: Optočlen zapojen v konduktivním režimu [31]	39
Obr. 31: Realizovaný převodník	40
Obr. 32: Schéma zapojení převodníku bez linearizace	46
Obr. 33: Návrh převodníku s linearizací	48
Obr. 34: Graf závislosti výstupního napětí na teplotě	58
Obr. 35: Graf závislosti odchylky linearity na teplotě	59
Obr. 36: Rozmístění součástek na plošném spoji, strana součástek	60
Obr. 37: Rozmístění součástek na plošném spoji, strana spojů	61

SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Materiály nejčastěji používané pro kovové snímače teploty	18
Tab. 2: Naměřené hodnoty při teplotě +20 °C bez zapojení linearizace.....	54
Tab. 3: Naměřené hodnoty při teplotě +20 °C	55
Tab. 4: Naměřené hodnoty při teplotě -10 °C	56
Tab. 5: Naměřené hodnoty při teplotě +50 °C	57
Tab. 6: Rozpiska součástek	61

SEZNAM ZKRATEK

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
A_U	-	napěťové zesílení
I_{c200}	mA	kolektorový proud tranzistoru T1 při měřené teplotě +200 °C
I_{c-50}	mA	kolektorový proud tranzistoru T1 při měřené teplotě -50 °C
I_m	mA	proud rezistory R3 a R4
I_{pt200}	mA	proud měřicím čidlem Pt 100 při teplotě +200 °C
I_{vstIC2}	uA	proud do vstupu operačního zesilovače IC2
R_0	Ω	odpor při teplotě 0 °C
R_{100}	Ω	odpor při teplotě 100 °C
$R_{pt250ček}$	Ω	vypočtený lineární odpor čidla při teplotě +250 °C
$R_{pt250skut}$	Ω	tabulkový odpor čidla při teplotě +250 °C
R_{pt-50}	Ω	tabulkový odpor čidla při teplotě -50 °C
R_v	Ω	odpor přírodních vodičů
t	°C	teplota
U_m	V	naměřené napětí
U_{m2}	V	napětí na rezistoru R4 + R5
U_{m-50}	V	napětí na rezistoru R2 + odpor čidla Pt 100 při teplotě -20 °C
U_n	V	napájecí napětí
U_{n200}	V	napájecí napětí ze stabilizátoru I1 při měřené teplotě +200 °C
U_{out}	V	výstupní napětí převodníku
U_{oz}	V	výstupní napětí na rezistoru R10 R11
U_{oz200}	V	výstupní napětí na rezistoru R10 R11 při teplotě +200 °C
U_{oz-50}	V	výstupní napětí na rezistoru R10 R11 při teplotě -50 °C
U_{ref}	V	referenční hodnota napětí dle katalogu
U_s	V	napětí skutečné
V DC	V	stejnoseměrná hodnota napětí
V pk	V	vrcholová hodnota napětí
V RMS	V	efektivní hodnota napětí
α	K ⁻¹	teplotní součinitel odporu
ΔU_{IC1}	V	rozdíl výstupního napětí na rezistoru R10 R11
ΔU_p	V	napěťový rozdíl mezi dvěma potenciály

1. ÚVOD

Lidé už odedávna měří různé fyzikální veličiny, mezi nimi i teplotu. Tu lze měřit různými způsoby a s různou přesností. S rozvojem průmyslu bylo zapotřebí měřit teplotu jednodušeji a přesněji. Průmyslová výroba se rozvíjela a zdokonalovala a na základě teploty bylo nutné řídit výrobní procesy. Bylo třeba převést teplotu na elektrický signál a ten zpracovat v jednotce pro řízení procesu. Způsobů realizace tohoto převodu je mnoho, záleží na měřené teplotě, vlastnostech měřeného objektu, požadované přesnosti a rychlosti měření. Od těchto požadavků se odvíjí výběr čidla teploty a převodníku naměřené teploty na elektrický signál. S výběrem čidla souvisí problémy se zpracováním a úpravou naměřeného signálu s malou úrovní a jeho galvanickým oddělením. To klade nároky na vývoj a konstrukci převodníků pro snímače teploty.

2. VSTUPNÍ ČLEN ODPOROVÉHO SNÍMAČE TEPLOTY

2.1 ROZDĚLENÍ ODPOROVÝCH TEPLOTNÍCH SNÍMAČŮ [1] [2]

Teplotu lze snímat různými způsoby, v našem případě nás zajímá závislost teploty na odporu snímače. Snímače se dají dělit podle materiálu, z něhož jsou vyrobeny, na:

- kovové
 - platina
 - nikl
 - Balco (Ni-Fe)
 - měď
- polovodičové
 - termistory
 - negistory
 - pozistory
 - monokrystalické odporové senzory
 - monolitické PN senzory teploty

Kovové odporové teplotní senzory se nazývají RTD (Resistance Temperature Detectors). Na jejich výrobu se používají různé materiály (tab.1) [1], od kterých se odvíjí vlastnosti těchto kovových snímačů teploty. Pro kovové odporové senzory teploty, v malém rozsahu teplot od 0 °C do +100 °C, platí s menší nepřesností lineární vztah:

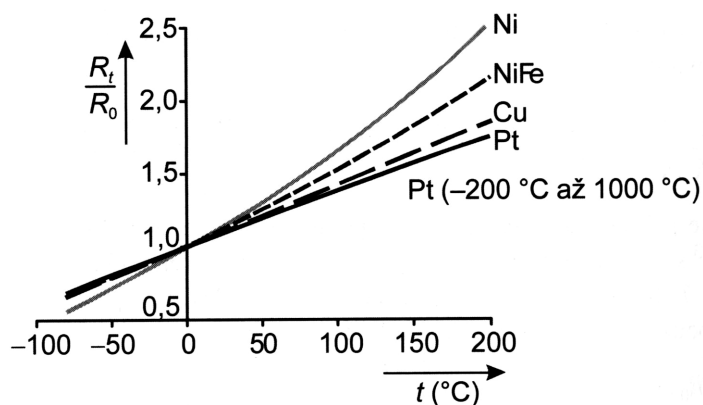
$$R_t = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot t) \quad (1)$$

R_0 odpor čidla při teplotě 0 °C [Ω]

α teplotní součinitel odporu materiálu [K⁻¹]

t dosažená teplota ve °C

Pro větší rozsahy teplot nelze tento lineární vztah (1) použít. Závislost odporu na teplotě pro různé odporové snímače teploty je znázorněn na obr.1 [1].



Obr. 1: Teplotní závislost odporových snímačů teploty

Stejně materiály v závislosti na jejich čistotě mají různý teplotní součinitel odporu. Na základě určení průměrného teplotního součinitele je normou upraven průběh závislosti odporu na teplotě. Tento teplotní součinitel je dán vztahem:

$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{100 \cdot R_0} \quad (2)$$

R_{100} odpor čidla při teplotě +100 °C [Ω]

R_0 odpor čidla při teplotě 0 °C [Ω]

Dalším parametrem kovových odporových teplotních snímačů je poměr odporů čidla W_{100} . Je určen vztahem:

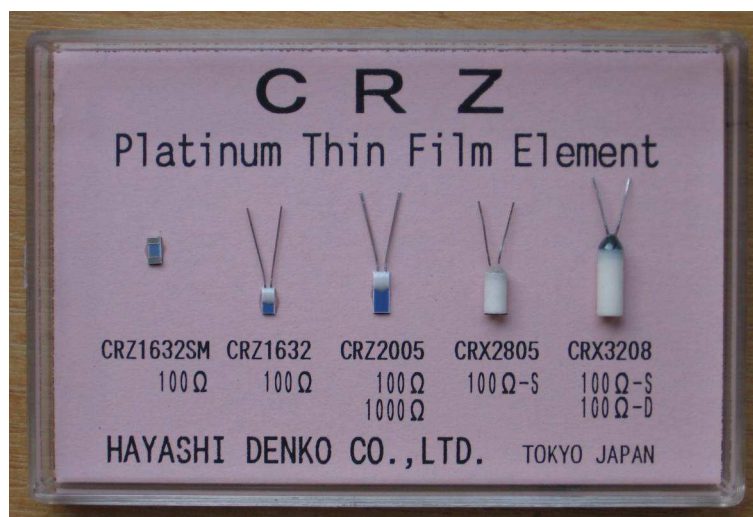
$$W_{100} = \frac{R_{100}}{R_0} \quad (3)$$

R_{100} odpor při teplotě +100 °C [Ω]

R_0 odpor při teplotě 0 °C [Ω]

Tab. 1: Materiály nejčastěji používané pro kovové snímače teploty

Materiál	$\alpha \cdot 10^2 \text{ (K}^{-1}\text{)}$	Teplotní rozsah (°C)	Poměr odporů W_{100}
Platina	0,385 až 0,391	-200 až +850	1,3850
Nikl	0,317 až 0,675	-70 až +150 (+200)	1,6180
Ni-Fe	0,518 až 0,527	-100 až +200	1,4620
Měď	0,426 až 0,433	-50 až +150	1,4260



Obr. 2: Různé provedení teplotních čidel Pt 100

2.1.1 Platinový odporový teplotní snímač

Výrobní provedení těchto snímačů je různé dle požadovaného použití a maximální měřené teploty (obr.2). Nejčastěji se vyrábí jako tzv. napařované provedení, kdy na keramický substrát je nanесena tenká vrstva platiny a pomocí laseru je odpor snímače nastaven přesně na jmenovitou hodnotu. Toto provedení je velmi malé a otřesuvzdorné. Do vyšších teplot se používá provedení se stočeným platinovým drátem do spirály. Mezi největší přednosti těchto snímačů patří dlouhodobá teplotní stálost, chemická netečnost a velmi široký rozsah měřených teplot (-200 až +850 °C). Čistota platiny se udává poměrem odporů W_{100} .

Normou IEC-751 (IEC-ČSN 751) je předepsán poměr elektrického odporu $W_{100} = 1,385$. V jiných částech světa se používají platinová čidla s jiným poměrem odporů. Dle doporučení IEC-751 se platinová odporová čidla rozdělují do dvou základních tolerančních tříd A a B. Třída A je stanovena pro rozsah teplot od -200 do +650 °C, třída B pro rozsah teploty od -200 do +850 °C.

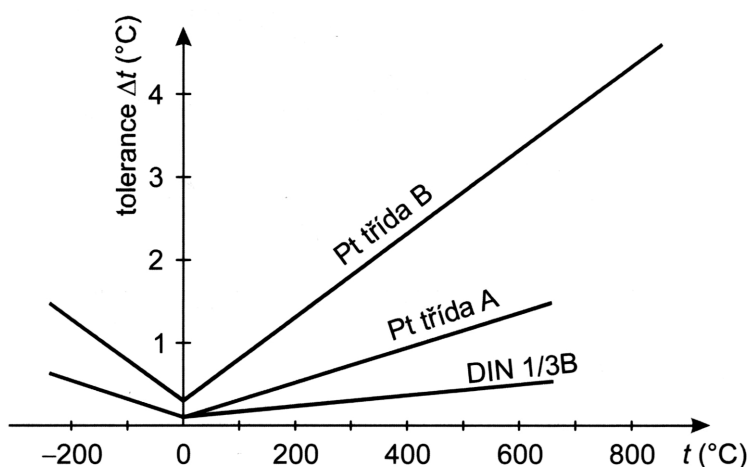
Pro dovolené tolerance Pt měřicích odporů dle IEC-751 (obr.3) platí podmínky:

třída přesnosti A: $\Delta t = \pm (0,150 + 0,002 \cdot |t|)$ (°C),

třída přesnosti B: $\Delta t = \pm (0,300 + 0,005 \cdot |t|)$ (°C).

Kromě doporučení IEC751 je používáno přesnější kritérium označované DIN 1/3 B, pro které platí:

$\Delta t = \pm (0,100 + 0,0017 \cdot |t|)$ (°C)



Obr. 3: Dovolené tolerance průmyslových snímačů Pt dle IEC 741

Platinová čidla se rozdělují dle odporu při teplotě 0 °C. Nejčastěji používané je čidlo Pt 100 (100 Ω při teplotě 0 °C), používají se i další jako Pt 50, Pt 200, Pt 500, Pt 1000 a Pt 2000.

Závislost odporu platinového čidla na teplotě je velmi dobře popsána v různých tabulkách [2] a platí pro ni:

$$R_t = R_0 \cdot (1 + A \cdot t + B \cdot t^2 + C \cdot t^3 \cdot (t - 100)) \quad (4)$$

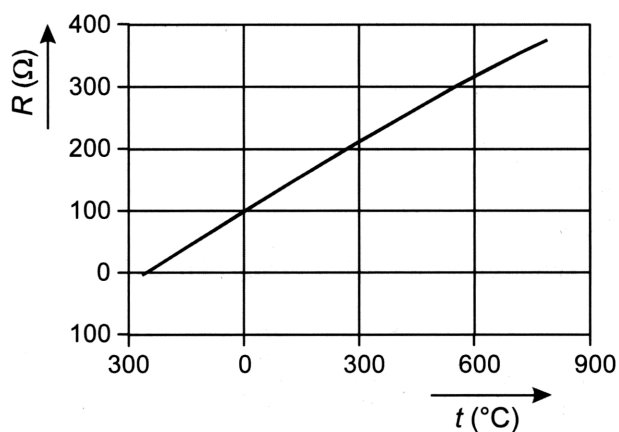
R_0 = odpor při teplotě 0 °C, nejčastěji 100 Ω

$$A = 3,90802 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$$

$$B = -5,80195 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-2}$$

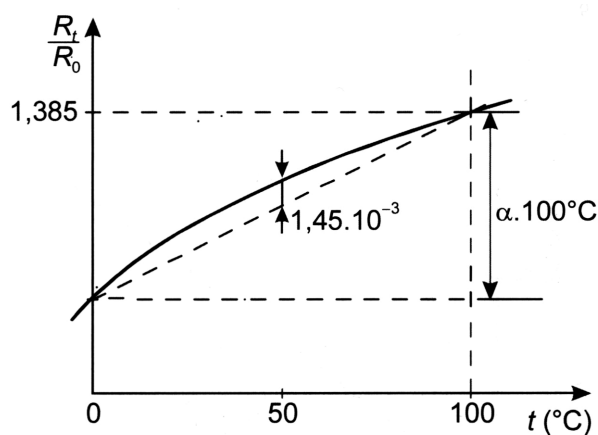
$$C = -4,27350 \cdot 10^{-12} \text{ K}^{-4} \quad \text{pro } t < 0 \text{ °C}$$

$$C = 0 \quad \text{pro } t > 0 \text{ °C}$$



Obr. 4: Závislost odporu čidla Pt 100 na teplotě [1]

Jestliže nepožadujeme přesné měření v rozsahu teplot 0 °C až +100 °C, lze zanedbat nelinearitu čidla Pt 100.



Obr. 5: Nelinearita čidla Pt 100 [1]

2.1.2 Niklový odporový teplotní snímač

Niklová čidla jsou vyráběna tenkovrstvou technologií podobně jako čidla platinová. Výhodou niklových teplotních čidel je nízká cena, velká citlivost, rychlá odezva a malé rozměry. Nevýhodou je omezený teplotní rozsah, horší dlouhodobá stálost, menší odolnost vůči působení prostředí, značná nelinearita oproti platinovým čidlům. Tato nelinearita se dá lehčeji kompenzovat paralelním zapojením rezistoru k čidlu. Stejně jako platinová čidla se vyrábějí niklová čidla se základním rozsahem $R_0 = 100 \Omega$, ale i s dalšími rozsahy 200Ω , 500Ω , 1000Ω a 2000Ω . Nejčastěji jsou používána čidla Ni 1000. Závislost odporu na teplotě je upraven normou IEC-751 (DIN 43760).

Pro niklová teplotní čidla s teplotním součinitelem odporu 0,618 [3] platí:

$$R_t = R_0 \cdot (1 + A \cdot t + B \cdot t^2 + C \cdot t^4 + D \cdot t^6) \quad (5)$$

$$A = 5,485 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$$

$$B = 6,65 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-2}$$

$$C = 2,805 \cdot 10^{-11} \text{ K}^{-4}$$

$$D = 2,0 \cdot 10^{-17} \text{ K}^{-6}$$

2.1.3 Měděné odporové snímače teploty

Měď se používá v teplotním rozsahu -200 až $+200$ °C. Pro závislost odporu na teplotě lze v rozmezí teplot -50 až $+450$ °C užít vztah (1), kde $\alpha = 4,26 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$. Protože měď má malou rezistivitu a snadno oxiduje, měděná teplotní čidla se nevyrábí. Toto se dá využít k jednoduchému a rychlému měření např. teploty měděného vinutí odpojeného elektrického stroje.

2.1.4 Polovodičové snímače teploty

2.1.4.1 Termistor

Je to teplotně závislý rezistor zhotovený z polovodičových feroelektrických keramických materiálů ve tvaru disku, destičky, kapky, válečku aj.

Výhodou je velká teplotní citlivost, malé rozměry, různé tvary, nízká cena. Nevýhodou je nelineární charakteristika. V závislosti na materiálu má termistor záporný teplotní součinitel odporu (negastor, NTC termistor) nebo kladný teplotní součinitel odporu (pozistor, PTC termistor).

Pro negastory je běžný rozsah teplot od -50 až do +150 °C.

Pozistory mají velmi strmý nárůst odporu s teplotou, proto se používají v el. obvodech převážně jako tepelné ochrany, omezovače proudu, teplotní regulace aj.

2.1.4.2 Monokrystalické Si senzory teploty

Používají se v rozsahu teplot od -50 do +150 °C, jsou levné, průběh charakteristiky je téměř lineární. Zástupcem jsou čidla řady KTY [4].

2.1.5 Monolitické senzory teploty

Tyto jsou nejčastěji založeny na teplotní závislosti PN přechodu v propustném směru. Mají teplotní rozsah od -55 do +150 °C. Zástupcem je LM 135, LM 235, LM 335 [5] s charakteristikou Zenerovy diody a citlivostí 10mV/K. Modernější senzory teploty mají číslicový výstup s konverzí na impulsní šířkovou modulaci nebo jsou to tzv. SMART senzory teploty s mikroprocesorem.

2.2 ZAPOJENÍ TEPLITNÍCH ČIDEL V OBVODU

Platinové čidlo (RTD) lze dle použití a způsobu vyhodnocení teploty v dané aplikaci zapojit několika způsoby. Při výběru zapojení jsme omezeni průchodem proudu čidlem. Při snaze o co největší změnu měřeného napětí na čidle můžeme zvyšovat proud, ale jen do určité míry. Vysoký proud čidlem může zkreslit výsledky měření, protože čidlo by se nadměrně ohřívalo procházejícím proudem, viz vzorec:

$$\Delta t = \frac{RI^2}{EK} \quad (6)$$

Δt samovyhřívání [°C]

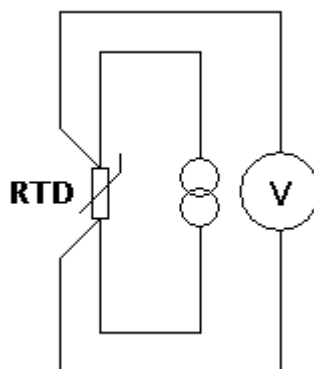
EK koeficient samovyhřívání [mW/°C]

I měřicí proud čidlem [mA]

R odpor čidla [kΩ]

Koeficient samovyhřívání závisí na okolním měřeném prostředí a na velikosti čidla. Např. pro čidlo CRZ-1632-100, což je čidlo Pt 100, udává výrobce pro vzduch $EK = 1$ a doporučuje max. měřicí proud 1 mA [6].

Čidlo můžeme zapojit čtyřvodičově, tzn. zapojit jej do obvodu proudového zdroje a snímat napětí na čidle [7].

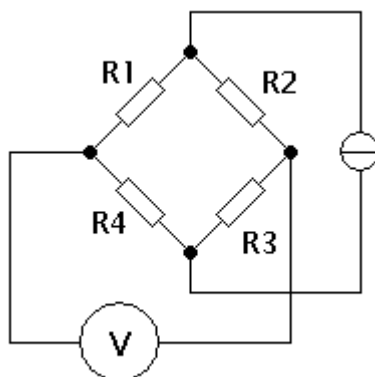


Obr. 6: Zapojení čidla Pt 100

Velmi často se používá zapojení do Wheatstoneova můstku. Jsou možná i jiná zapojení s operačními zesilovači nebo se speciálními obvody.

2.2.1 Wheatstoneův můstek [7]

Protože změna odporu s teplotou u platinových čidel není příliš velká a čidlo nemůžeme zatěžovat velkým procházejícím proudem kvůli ohřevu vlastního čidla vlivem měřicího proudu (použitelný proud je typicky 0,2 až 1 mA), čidlo se většinou zapojuje do měřicího můstku (obr.7). Linearita můstku je velmi dobrá, pomocí můstku můžeme vyhodnotit i malou změnu odporu čidla, signál obvykle zesilujeme operačním zesilovačem, který má velmi malou vstupní napěťovou nesymetrii. V závislosti na přesnosti měření, vzdálenosti čidla od obvodu vyhodnocování a velikosti okolní teploty se používá dvouvodičové, třívodičové a čtyřvodičové zapojení čidla [7].



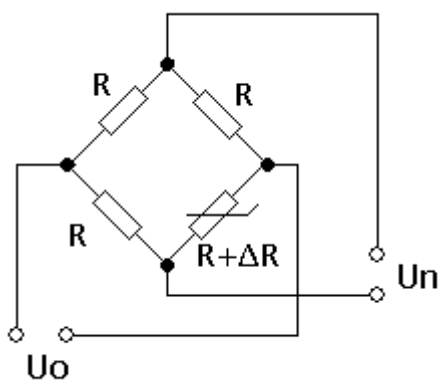
Obr. 7: Základní můstkové zapojení

Pro toto zapojení platí:

$$R1.R3 = R2.R4 \quad (7)$$

Pro účely snímání změny odporu s teplotou se užívá můstek s jedním proměnlivým prvkem (obr.8). Pro výstupní napětí U_o platí:

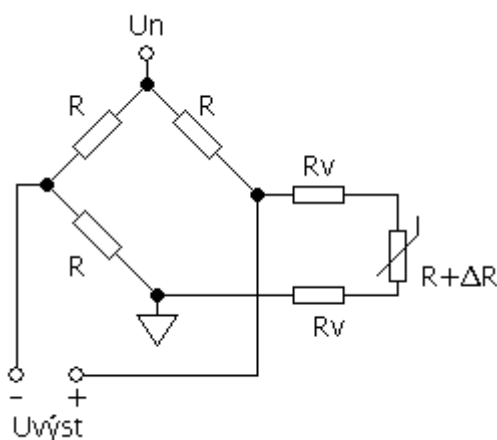
$$U_o = \frac{U_n}{4} \cdot \left(\frac{\Delta R}{R + \frac{\Delta R}{2}} \right) \quad (8)$$



Obr. 8: Můstek s jedním proměnlivým prvkem

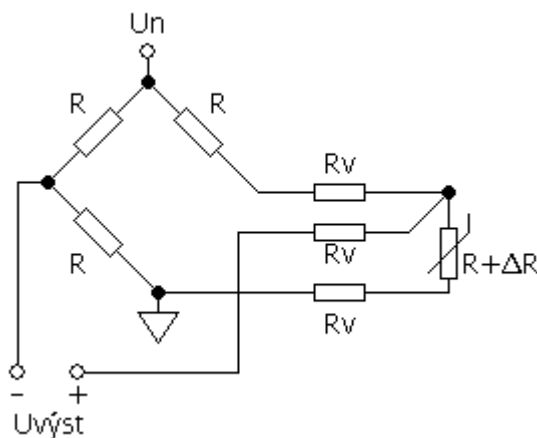
V tomto případě *chyba nelinearity zapojení* = % změna odporu / 2.

Při dvou vodičovém připojení (obr.9) se změna odporu přívodu R_v přičítá ke změně snímacího prvku a dochází k chybě při vyhodnocení odporu snímacího prvku.



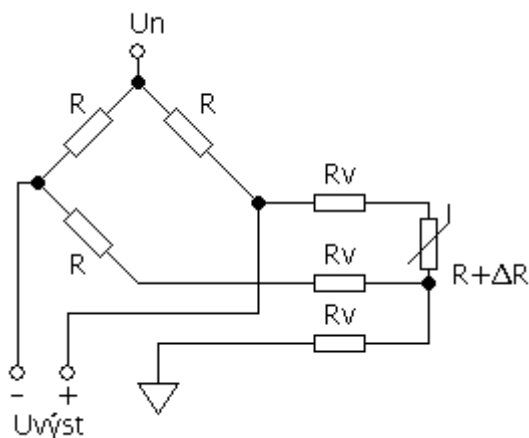
Obr. 9: Dvou vodičové zapojení

Při třívodičovém zapojení se odpor přívodu téměř úplně kompenzuje rovnoměrným rozdělením odporu přívodu do obou větví můstku (obr.10).



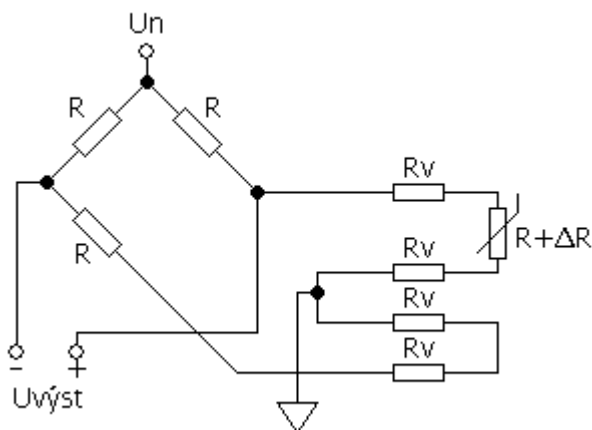
Obr. 10: Tří vodičové zapojení

V závislosti na dalším zpracování výstupního napětí můstku můžeme použít jiné třívodičové zapojení uvedené na obr.11 [8].



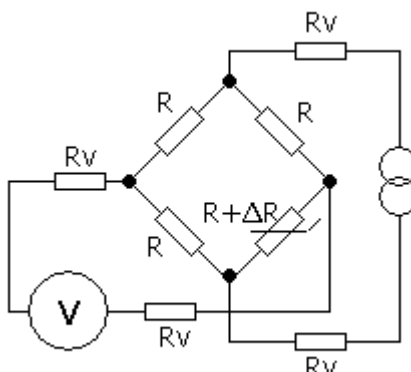
Obr. 11: Třívodičové jiné zapojení

Odpor přívodu úplně kompenzuje čtyřvodičové zapojení tzv. s volnou smyčkou (obr.12). Smyčka musí být umístěna poblíž přívodu k čidlu teploty.



Obr. 12: Čtyřvodičové zapojení

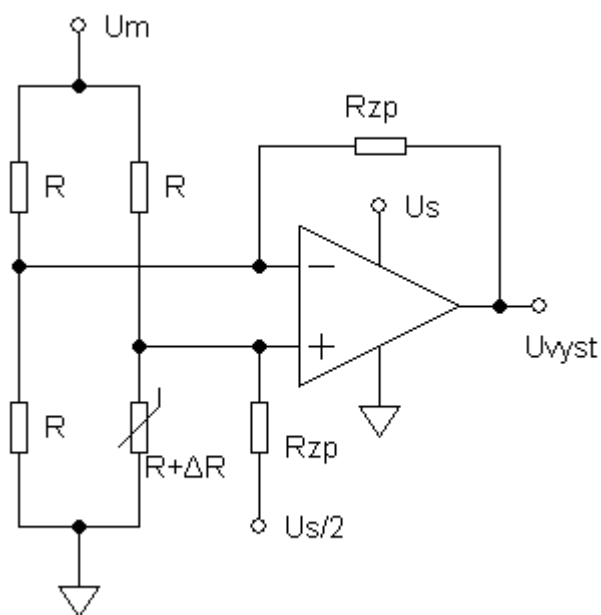
Používá se také klasické čtyřvodičové zapojení, kdy je měřící můstek napájen z proudového zdroje a výstup z můstku je snímán napětově (obr.13).



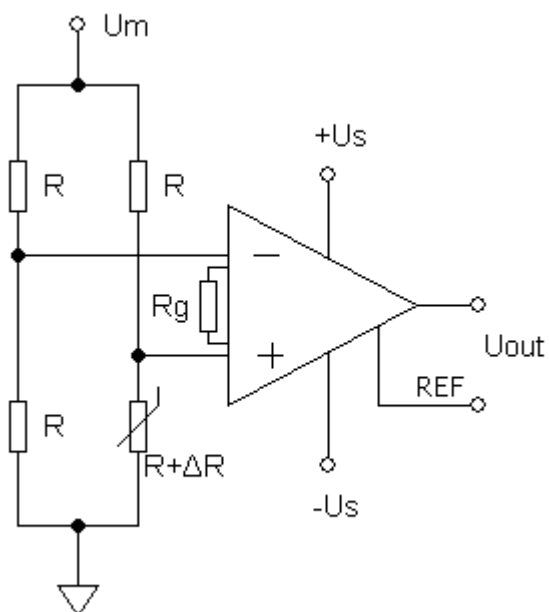
Obr. 13: Čtyřvodičové jiné zapojení

2.2.2 Praktické zapojení vstupního obvodu

Signál z čidla je v řádu desítek mV. Pro jeho vyhodnocení a zesílení se používá řada zapojení. Lze použít operační zesilovač zapojený jako diferenční zesilovač (obr.14). Jak již bylo uvedeno, vyhodnocované napětí je velmi malé, proto jsou kladeny nároky na použití operačního zesilovače, který musí mít velmi malou vstupní napěťovou nesymetrii. Pro náročnější aplikace se používají speciální provedení operačních zesilovačů, a to přístrojové operační zesilovače (obr.15) [7].



Obr. 14: Diferenční zesilovač



Obr. 15: Zapojení s přístrojovým zesilovačem

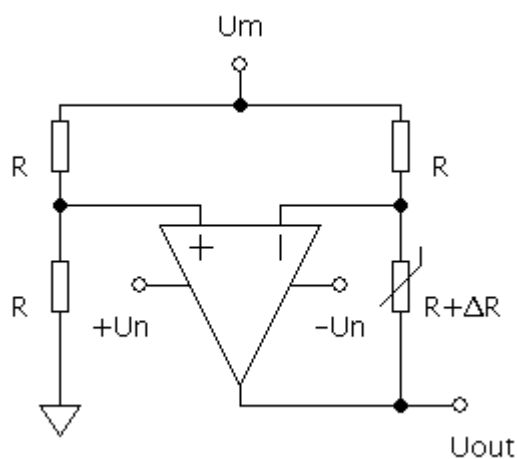
3. LINEARIZACE

3.1 TEORETICKÝ ÚVOD

Protože závislost odporu čidla Pt 100 na teplotě není lineární a při napájení měřicího můstku z napěťového zdroje dochází v závislosti na vyhodnocování k další nelinearitě, je nutno tento problém řešit. Nelinearita můstku se zlepší, jestliže je napájen z proudového zdroje. Odpor R platinového snímače je záporný, pro linearizaci jeho průběhu lze použít proudový zdroj se záporným vnitřním odporem nebo napěťový zdroj se zvyšujícím se napětím [7]. Tohle lze řešit různými způsoby.

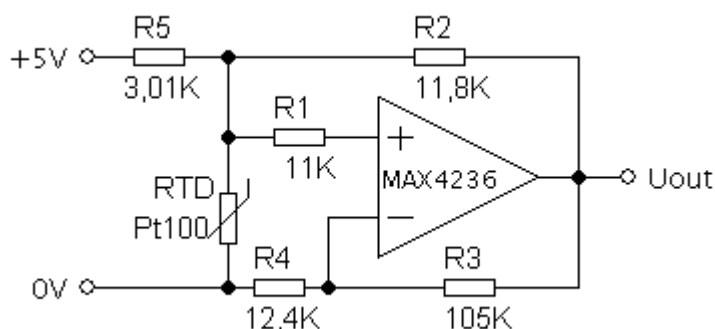
3.2 PŘÍKLADY ZAPOJENÍ

Jednou z možností je použít zapojení z obr.16, v němž je aktivní můstek s jediným proměnným prvkem, napětí na výstupu operačního zesilovače je přičítáno k napětí v proměnlivé větvi můstku a je lineárně závislé na ΔR [7].



Obr. 16: Linearizace čidla Pt 100

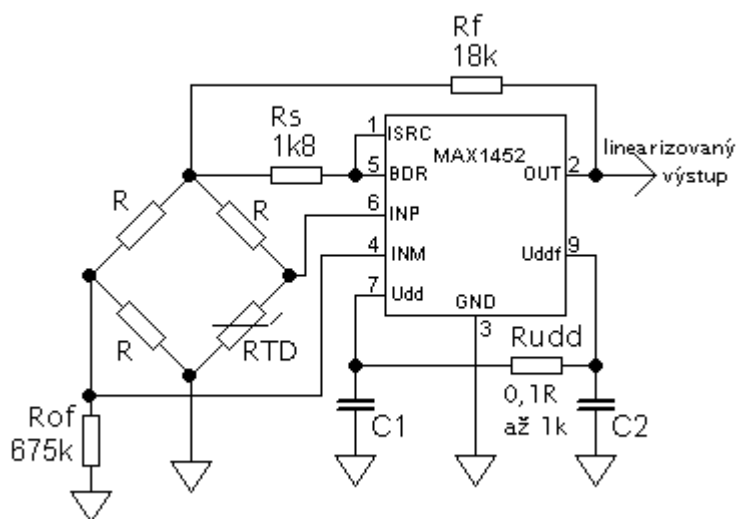
Další možností je aplikační zapojení (obr.17) operačního zesilovače MAX4236 od firmy MAXIM [9]. MAX4236 je přesný operační zesilovač s výstupem RAIL-TO-RAIL. Toto aplikační zapojení [10] linearizuje čidlo Pt 100 s chybou $+0,04\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $-0,02\text{ }^{\circ}\text{C}$ v rozmezí teplot -100 až $+200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Obvod stojí 93 Kč [11].



Obr. 17: Linearizace pomocí operačního zesilovače MAX4236

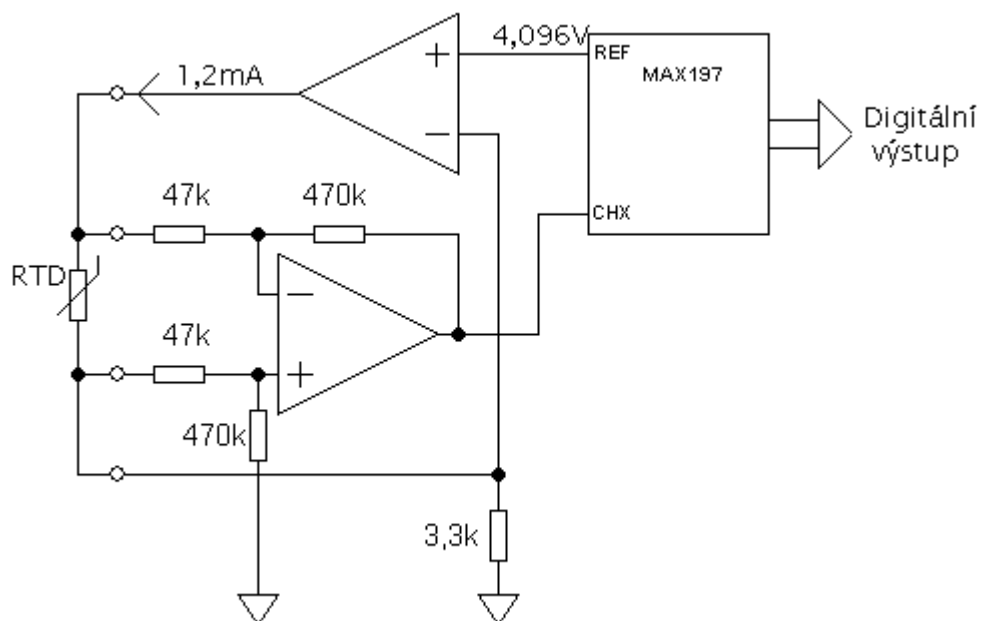
3.3 SPECIÁLNÍ OBVODY

Pro napájení měřicího můstku, snímání teploty a linearizaci platinového čidla lze použít i speciální navržené obvody, které mají ve svém výrobním programu výrobci elektronických obvodů. Firma Maxim nabízí obvody s linearizovaným výstupem (obr.18) [12] nebo obvody s výstupem digitálním (obr.19) [13]. Obvod MAX1452 [14] je určen spíše do řídicích celků jako např. řízení klimatizace. Vstupem může být RTD čidlo, čidlo snímání tlaku, vlhkosti. Vstupní zesilovač má nelinearitu 0,01 %. Obvod má vnitřní paměť, ve které mohou být uloženy hodnoty pro jinou kompenzaci výstupu. Výstup může být napěťový 0-5 V nebo proudová smyčka 4-20 mA. Obvod stojí 2,95 \$.



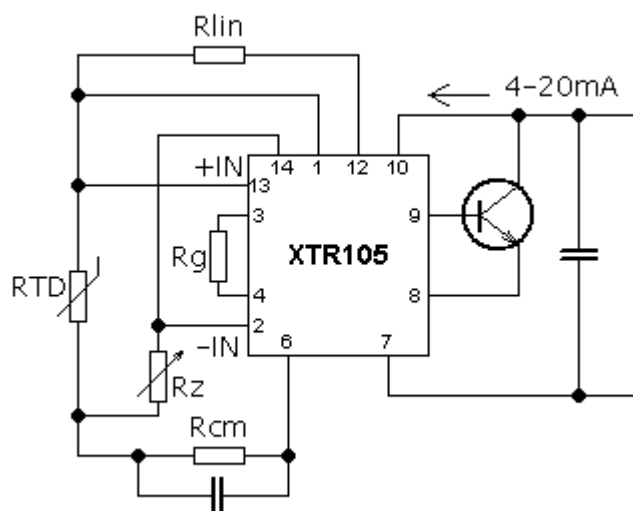
Obr. 18: Zapojení MAX1452

Chceme-li výstup z RTD čidla dále zpracovávat digitálně, řešením je použít analogově digitální převodník s referenčním proudovým zdrojem (obr.19), pomocí kterého odpor čidla digitalizujeme a linearizace je provedena digitálně v dané aplikaci. V průmyslové oblasti je možno použít MAX197 [15], což je 8 vstupový 12 bitový A/D převodník. Jeho cena je 1380 Kč [16].



Obr. 19: Zapojení MAX197

Velice známou firmou na poli zpracovávání signálu RTD čidel je firma BURR-BROWN [17], jejíž obvody řady XTR pro zpracování a linearizaci čidla RTD jsou velmi známé. Chyba nelinearity je u těchto obvodů menší než 0,01 %, chyba měřicího rozsahu je menší než 0,2 %. Obvod XTR105 [18] lze použít ve dvouvodičovém, třívodičovém (obr.20) a čtyřvodičovém zapojení. Výstupem je proudová smyčka 4-20 mA. Obvod stojí 250 Kč [16].



Obr. 20: Třívodičové zapojení XTR105

Řada výrobců v České republice vyrábí pro průmyslové použití modul pro měření s čidlem Pt 100. Například firma Rawet [19] dodává převodník PP110 se vstupem Pt 100 a proudovým nebo napětovým výstupem s různými možnostmi napájení převodníku. Převodník má třídu přesnosti 0,3 %. V případě, že je vyžadováno galvanické oddělení vstupu, je možné použít převodníky PXN24 nebo PXN230 se stejnými parametry jako převodník PP110.

4. GALVANICKÉ ODDĚLENÍ

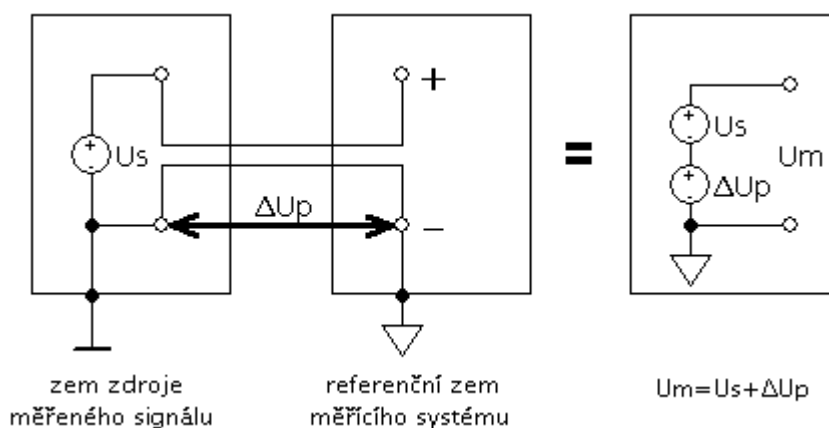
4.1 DŮVOD GALVANICKÉHO ODDĚLENÍ

V průmyslovém prostředí nebývá měřicí řetězec připojen galvanicky přímo do vstupního obvodu vyhodnocovacího členu, ale zpravidla přes galvanické oddělení. Vstupy programovatelných logických automatů (PLC) jsou už z výroby vybaveny galvanickým oddělením vstupů a výstupů.

Galvanické oddělení plní několik funkcí:

1) Oddělení z hlediska bezpečnosti – možnost úrazu obsluhy nebo možnost poškození zařízení vyšším napětím.

2) Oddělení z hlediska rušení – průmyslová činnost je zdrojem rušení, které ovlivňuje měřený signál. Při uzemnění vedení na straně snímání a vyhodnocení může dojít vlivem nestejného potenciálu na uzemnění ke vzniku zemních smyček a měřený signál je značně ovlivněn vyrovnávacími proudy. Proto se použije galvanické oddělení měřeného signálu.

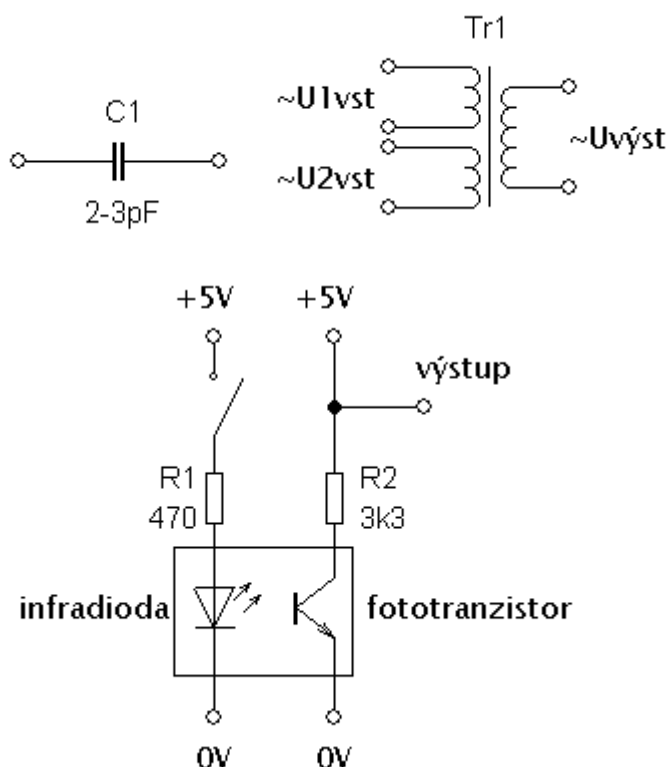


Obr. 21: Měřicí čidlo a zemní smyčka [20]

3) Oddělení z hlediska ekonomiky – při měření a vedení signálu na větší vzdálenosti v přírodním terénu může dojít k zásahu blesku poblíž vedení. Ochrana proti zásahu blesku je někdy problematická a tak dochází ke zničení galvanického oddělovače, ale vstupní karta měřicího systému, která je řádově dražší než galvanický oddělovač, zůstává v pořádku.

4.2 ZPŮSOB GALVANICKÉHO ODDĚLENÍ

Galvanické oddělení lze provést několika způsoby, záleží na povaze oddělovaného signálu a na způsobu vyhodnocování tohoto signálu. Pro galvanické oddělení se používá optočlen, lineární optočlen, transformátor, kondenzátor, jehož izolace bývá tvořena keramikou nebo oxidem křemíku SiO_2 .



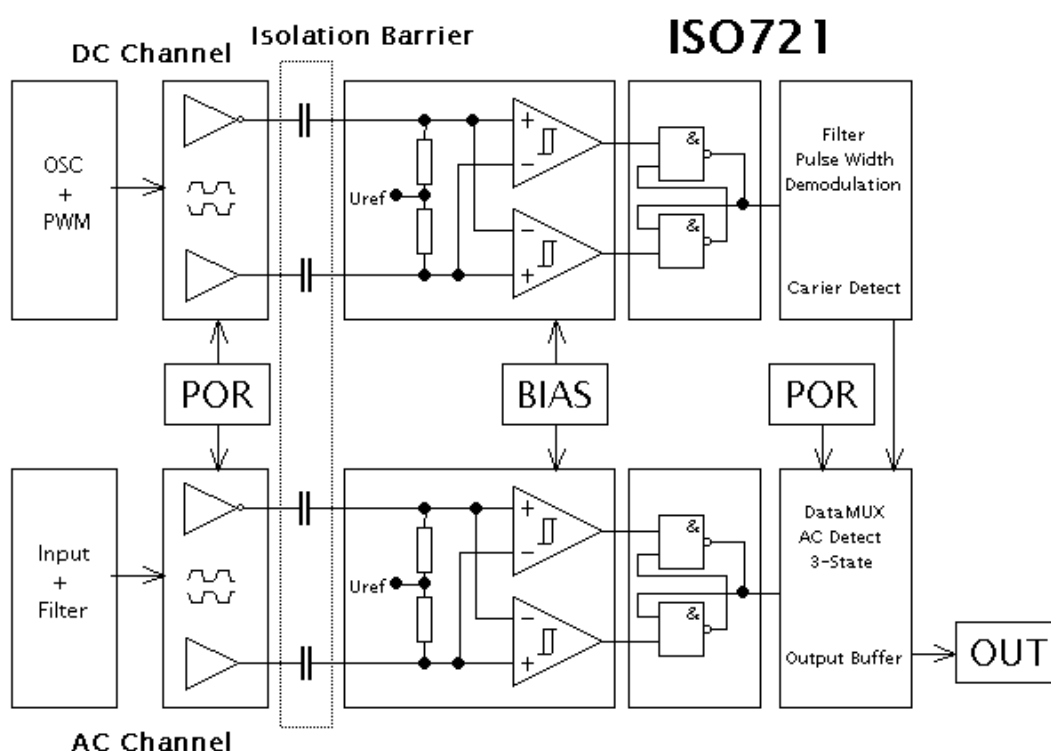
Obr. 22: Způsoby realizace galvanického oddělení [20]

Při volbě galvanického oddělení nás zajímá několik parametrů:

- maximální oddělovací napětí
- maximální frekvence vstupního signálu (při digitálním signálu)
- nelinearita vstupu a výstupu (při analogovém signálu)
- zpoždění výstupu oproti vstupu

Na trhu je velké množství speciálních obvodů pro galvanické oddělení různých signálů pracujících na různém principu. Velmi často se galvanicky oddělují

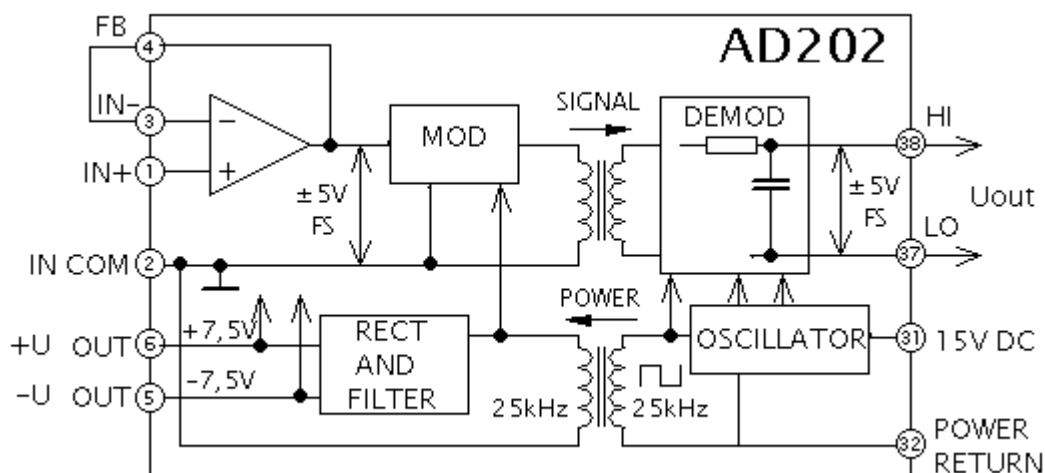
různé sběrnice, např. RS 485, pro niž se vyrábí speciální obvod pro galvanické oddělení. Velmi rozšířené jsou obvody pro galvanické oddělení digitálního signálu. Od firmy Texas Instruments je to např. obvod ISO721 [21]. Používá se na oddělení průmyslových sběrnic. Vstupem jsou logické signály do rychlosti 150 Mbps. Pevnost galvanického oddělení je 4000 V pk a je tvořeno kapacitně oxidem křemíku (SiO_2). Obvod stojí 2,41 € [22].



Obr. 23: Vnitřní zapojení digitálního oddělovače ISO721

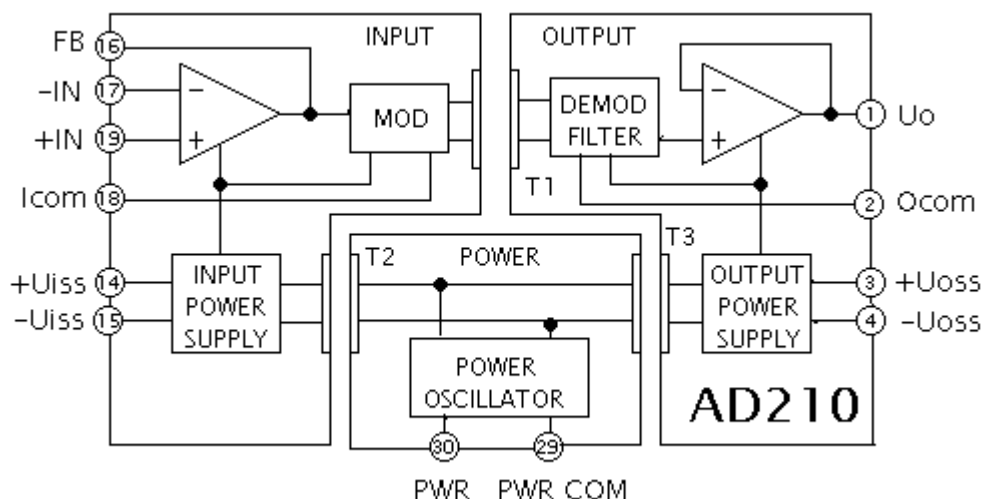
Galvanicky se rovněž odděluje analogový signál, a to několika způsoby.

Firma Analog Devices má v sortimentu AD202 [23]. Analogový signál je namodulován na střídavý signál a je přenesen transformátorem přes galvanickou bariéru, jejíž pevnost je 2000 V pk. Obvod je napájen na výstupní straně, pomocí oscilátoru je napájení upraveno a transformováno na vstupní stranu. Maximální nelinearita obvodu je $\pm 0,025 \%$. Obvod stojí 1919 Kč [16].



Obr. 24: Vnitřní zapojení AD202

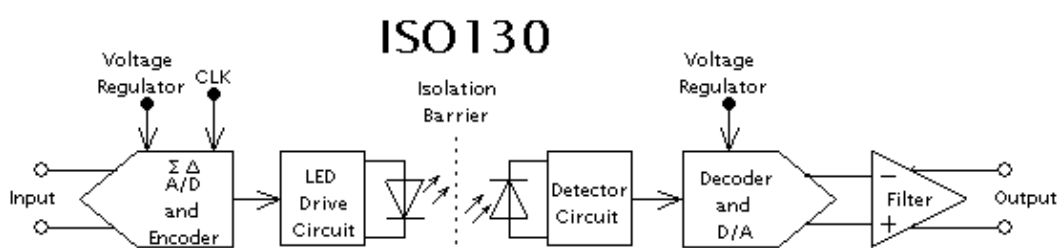
Obvod AD210 [24] od stejné firmy je řešen podobně, navíc má oddělené napájení obvodu od výstupního signálu. Pevnost galvanického oddělení je 2500 V RMS, maximální nelinearita je $\pm 0,012 \%$. Obvod stojí 61,1 € [22].



Obr. 25: Vnitřní zapojení AD210

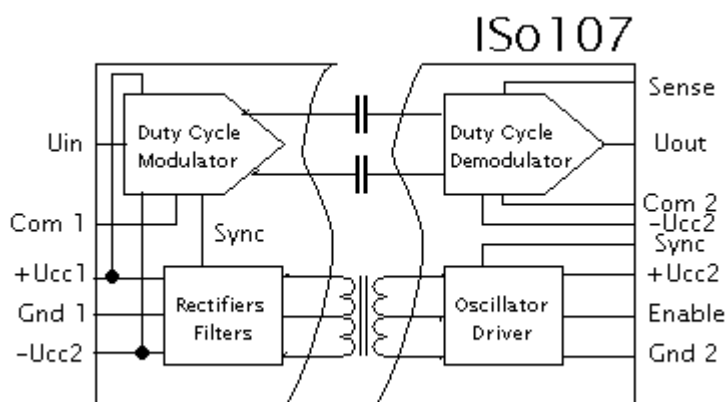
Velký výběr těchto obvodů má firma BURR-BROWN, se svou řadou ISO100 – ISO130. Tyto obvody jsou koncipovány jako zesilovače s galvanicky odděleným vstupem a výstupem.

U obvodu ISO130 [25] je na vstupu A/D převodník, logický signál je přenesen optočlenem a zpět převeden v D/A převodníku. Galvanické oddělení má pevnost 3750 V RMS. Maximální nelinearita je 0,25 %.



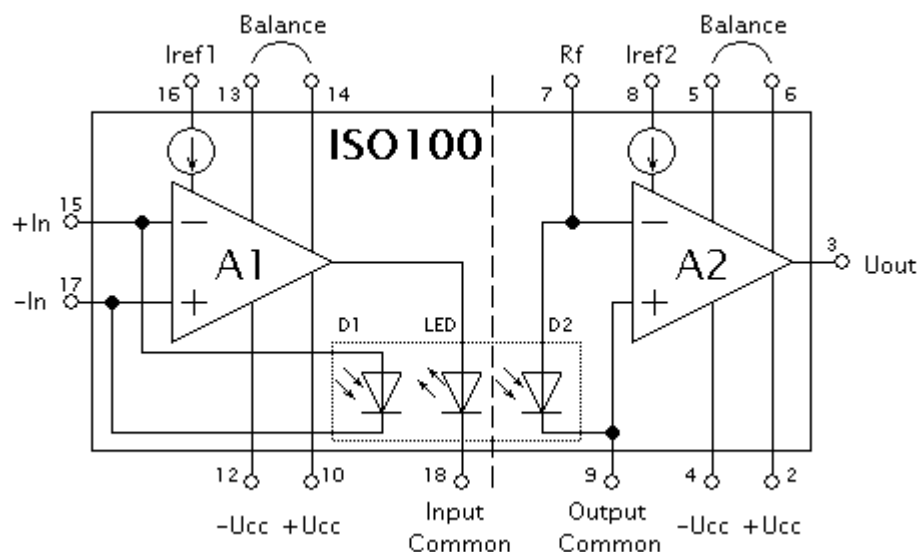
Obr. 26: Vnitřní zapojení ISO130

Obvod ISO107 [26] moduluje vstupní stejnosměrný signál na střídavý a přenáší se přes kapacitu, tvořenou keramikou, na výstup. Obvod je napájen z výstupní strany a napájení je opět transformováno na vstupní stranu. Pevnost galvanického oddělení je 2500 V RMS, maximální nelinearita 0,01 %. Obvod stojí 458,14 € .



Obr. 27: Vnitřní zapojení ISO107

Obvod ISO100 [28] používá pro galvanické oddělení optočlen se dvěma přijímacími fotodiodami, každá je na jedné straně bariéry. Pevnost galvanického oddělení je 750 V pk, maximální nelinearita 0,03 %. Obvod stojí 179,02 € [22].

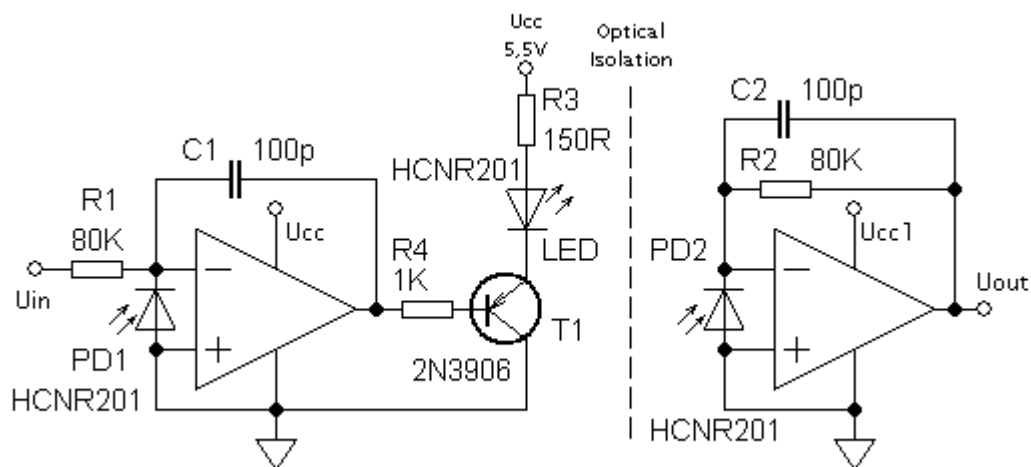


Obr. 28: Vnitřní zapojení ISO100

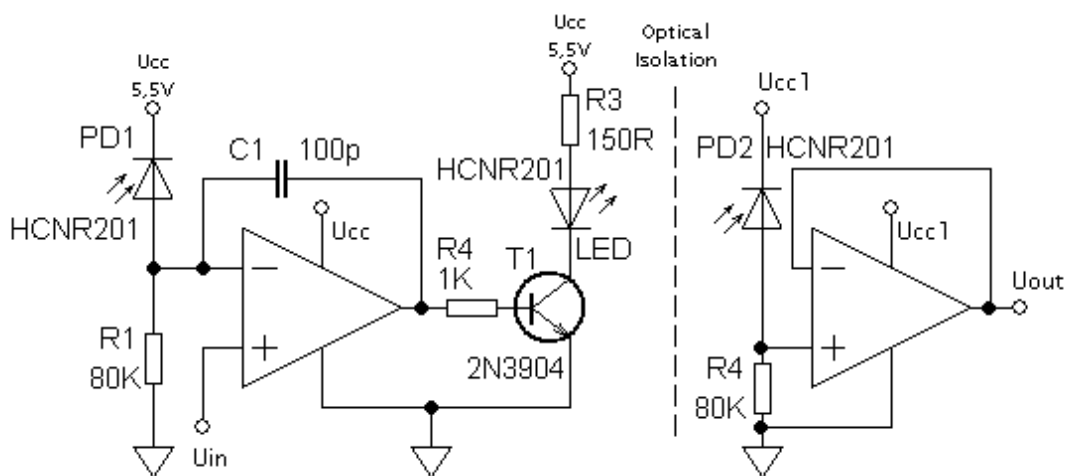
Velmi zajímavou součástí pro galvanické oddělení analogového signálu je lineární optočlen, který mají v sortimentu firmy Clare [29], dříve Infineon, nyní Vishay [30] a Agilent. Obvody od jednotlivých výrobců se navzájem liší.

Pro moji práci jsem vybral lineární optočlen HCNR201 od firmy Agilent, nyní Avago Technologies [31]. Obvod stojí 3,39 € [22].

Princip funkce je totožný jako v obvodu ISO100. Lineární optočlen je tvořen na vstupní straně vysílací diodou a přijímací fotodiodou, na výstupní straně také fotodiodou. Obě fotodiody jsou spárovány. Lineární optočlen může být zapojen dvěma základními způsoby, přijímací fotodiody mohou pracovat ve fotovoltaickém nebo konduktivním režimu. Optočlen HCNR201 má elektrickou pevnost 5000 V RMS, nelinearitu 0,01 %.



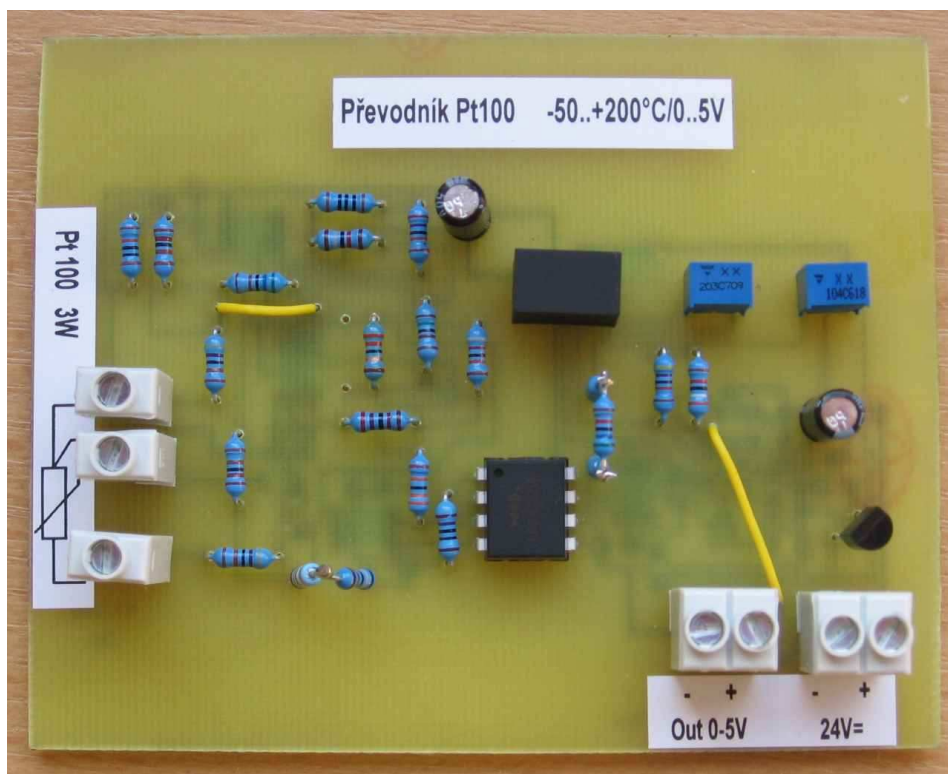
Obr. 29: Optočlen zapojen ve fotovoltaičském režimu [31]



Obr. 30: Optočlen zapojen v konduktivním režimu [31]

5. NÁVRH ZAPOJENÍ

Pro konstrukci měřicího modulu jsem vybral zapojení čidla teploty do Wheatstoneova můstku a vyhodnocení operačním zesilovačem v invertujícím zapojení. Linearizace měřicího můstku i měřicího čidla je provedena zvyšováním napětí pro napájení měřicího můstku. Galvanické oddělení signálu se děje pomocí lineárního optočlenu HCNR201 [31], galvanické oddělení napájení vstupní části je provedeno DC/DC měničem TME2412S od firmy TracoPower [32]. Převodník byl realizován na desce plošných spojů, viz obr.31. Schéma zapojení a návrh plošného spoje byl nakreslen v návrhovém systému Eagle. Zobrazení osazení plošného spoje součástkami je uvedeno v příloze B.



Obr. 31: Realizovaný převodník

5.1 NÁVRH VSTUPNÍHO MĚŘICÍHO OBVODU

Musíme určit hodnoty rezistorů pro měřicí můstek. Ze vzorce (3) nám vychází pro $t = -50\text{ °C}$ odpor čidla Pt 100 $R = 80,307\ \Omega$ a pro $t = +200\text{ °C}$ $R = 175,840\ \Omega$. Měřicí proud čidlem je doporučen $I = 0,2$ až 1 mA . Rezistor v bočních větvích můstku má být řádově větší než změna odporu měřicího čidla. Protože změna napětí na čidle bude malá, musím zvolit operační zesilovač s malou vstupní napětíovou nesymetrií. Proto jsem vybral OPA 333 [33]. Jeho doporučené napájecí napětí je max. $5,5\text{ V}$, takže napájecí napětí jsem zvolil $U_n = 4,8\text{ V}$, pro stabilizaci napětí U_n jsem zvolil LP2951, což je nízkopříkonový stabilizátor napětí, jehož výstupní napětí lze regulovat.

Z katalogového údaje LP2951 [34] lze vypočítat rezistory pro nastavení napájecího napětí $U_n = 4,8\text{ V}$ pro měřený obvod.

$$U_n = U_{ref} \cdot \left(1 + \frac{R_{16-19}}{R_{20}} \right) \quad (9)$$

$$R_{20} = 100\text{ k}\Omega$$

$$U_{ref} = 1,235\text{ V}$$

$$\text{Obvykle se volí } R_{12} = 100\text{ k}\Omega$$

$$\text{Výpočtem } R_{16-19} = 288,663\text{ k}\Omega$$

Protože U_{ref} není přesně $1,235\text{ V}$, měřením bylo zjištěno U_n vyšší než $4,8\text{ V}$. Protože jsem potřeboval dodržet hodnotu U_n , byly rezistory $R_{16} - R_{19}$ určeny na základě měření U_{ref} .

$$R_{16} = 1,5\text{ k}\Omega, R_{17} = 18\text{ k}\Omega, R_{18} = 110\ \Omega, R_{19} = 270\text{ k}\Omega$$

Nejvyšší měřicí proud čidlem Pt 100

$$I_{Pt200} = \frac{U_n}{R_1 + R_2 + R_{Pt200}} = \frac{4,8}{4700 + 4700 + 80,307} = 0,506\text{ mA} \quad (10)$$

Rozdíl změny napětí při změně snímané teploty

$$\begin{aligned}\Delta U &= U_n \cdot \frac{R_2 + R_{Pt200}}{R_1 + R_2 + R_{Pt200}} - U_n \cdot \frac{R_2 + R_{Pt-50}}{R_1 + R_2 + R_{Pt-50}} = \\ &= 4,8 \cdot \frac{4875,84}{9575,84} - 4,8 \cdot \frac{4780,307}{9480,307} = 23,741 \text{ mV}\end{aligned}\quad (11)$$

Pro $t = -50^\circ\text{C}$ jsem zvolil výstupní napětí z operačního zesilovače IC1 $U_{oz-50} = 0,4 \text{ V}$, pro $t = +200^\circ\text{C}$ jsem zvolil napětí $U_{oz200} = 3,4 \text{ V}$

Zesílení operačního zesilovače IC1

$$A_U = \frac{U_{výst}}{\Delta U} = \frac{3}{23,741 \cdot 10^{-3}} = 126,4 \quad (12)$$

Proud I_m druhou větví můstku jsem zvolil vyšší, než měřicí proud čidlem Pt 100.

$$I_m = \frac{U_n}{R_3 + R_4} = \frac{4,8}{2200 + 2200} = 1,091 \text{ mA} \quad (13)$$

Vypočtení zpětnovazebního rezistoru:

Zvolíme $R_6 = 5600 \Omega$ a vypočteme R_{vst}

$$R_{vst} = (R_3^{-1} + R_4^{-1})^{-1} + R_6 = (2200^{-1} + 2200^{-1})^{-1} + 5600 = 6700 \Omega \quad (14)$$

$$R_{zpěp} = A_U \cdot R_{vst} = 126,4 \cdot 6700 = 846,88 \text{ M}\Omega \quad (15)$$

Na základě výpočtu určíme

$$R_8 = 820 \text{ k}\Omega \quad R_9 = 27 \text{ k}\Omega$$

Vypočteme rezistor R_5 pro posun výstupního napětí operačního zesilovače IC1 při $t = -50^\circ\text{C}$

Jestliže $R_3 = R_4$ potom $U_{oz} = 2,4 \text{ V}$. Protože požadujeme $U_{oz-50} = 0,4 \text{ V}$, musíme k rezistoru R_4 dopočítat rezistor R_5 .

$$\Delta U_{IC1} = U_{oz} - U_{oz-50} = 2,4 - 0,4 = 2 \text{ V} \quad (16)$$

$$\Delta U = \frac{\Delta U_{IC1}}{A_v} = \frac{2}{126,4} = 15,823 \text{ mV} \quad (17)$$

Napětí na dolní polovině můstku s čidlem při teplotě -50°C je

$$U_{m-50} = U_n \cdot \frac{R_2 + R_{Pt-50}}{R_1 + R_2 + R_{Pt-50}} = 4,8 \cdot \frac{4700 + 80,307}{4700 + 4700 + 80,307} = 2,42033 \text{ V} \quad (18)$$

Napětí na druhé dolní větvi můstku potřebujeme vyšší než je původně vypočteno

$$U_{m2} = U_{m-50} + \Delta U = 2,42033 + 15,823 \cdot 10^{-3} = 2,43615 \text{ V} \quad (19)$$

$$R_5 = R_4 \cdot \frac{U_{m2}}{U_n - U_{m2}} - R_4 = 2200 \cdot \frac{2,43615}{4,8 - 2,43615} - 2200 \hat{=} 68 \Omega \quad (20)$$

Při měření převodníku jsem zjistil, že rezistory R_3 a R_4 nemají přesně danou hodnotu. Pro žádanou hodnotu výstupního napětí operačního zesilovače IC1 jsem rezistor R_5 zvětšil na $71,9 \Omega$.

5.2 VÝPOČET PARAMETRŮ GALVANICKÉHO ODDĚLENÍ

Pro galvanické oddělení byl použit lineární optočlen HCNR201 v katalogovém zapojení [31] ve fotovoltaickém módu. Elektrická pevnost vstupu od výstupu je 5000 V RMS . Na obou stranách optočlenu byly použity opět operační zesilovače OPA333. Vstupní proud I_{vstIC2} do operačního zesilovače IC2 byl stanoven na hodnotu kolem $10 \mu\text{A}$.

$$I_{vstIC2} = \frac{U_{OZ200} - U_{OZ-50}}{R_{12}} = \frac{3,4 - 0,4}{330 \cdot 10^3} = 9,09 \mu\text{A} \quad (21)$$

Přenos A optočlenu byl změřen a jeho hodnota je $1,003$.

Výpočet zpětnovazebního odporu operačního zesilovače IC3 na výstupní straně:

$$R_{zp} = \frac{U_{out}}{I_{vstIC2} \cdot A} = \frac{5}{9,09 \cdot 10^{-6} \cdot 1,003} = 548354 \Omega \quad (22)$$

Pro možnost regulace výstupního napětí převodníku o hodnotu $\pm 2,5 \%$ zapojíme do zpětné vazby výstupního operačního zesilovače IC3 trimr R_{31} .

$$R_{31} = R_{zp} \cdot 5\% = 548354 \cdot 0,05 \approx 20 \text{ k}\Omega \quad (23)$$

Spočítáme hodnoty zpětnovazebních odporů:

$$R_{28} + R_{29} = R_{zp} - 0,5 \cdot R_{31} \Rightarrow R_{28} = 470 \text{ k}\Omega \quad R_{29} = 68 \text{ k}\Omega \quad (24)$$

Pro možnost regulace nulového výstupního napětí U_{out} použijeme v obvodu IC3 napěťovou referenci TL431 [35] o hodnotě $U_{ref} = 2,5 \text{ V}$.

$$R_{ref} = U_{ref} : \left(\frac{U_{OZ-50}}{R12} \cdot A \right) = 2,5 : \left(\frac{0,4}{330 \cdot 10^3} \cdot 1,003 \right) = 2056331 \Omega \quad (25)$$

Pro možnost nastavení nulového U_{out} vypočteme trimr R_{30} o hodnotě $\pm 2,5 \%$ z hodnoty R_{ref} .

$$R_{30} = R_{zp} \cdot 5\% = 2056331 \cdot 0,05 \approx 100 \text{ k}\Omega \quad (26)$$

potom hodnota referenčního rezistoru R_{27} je:

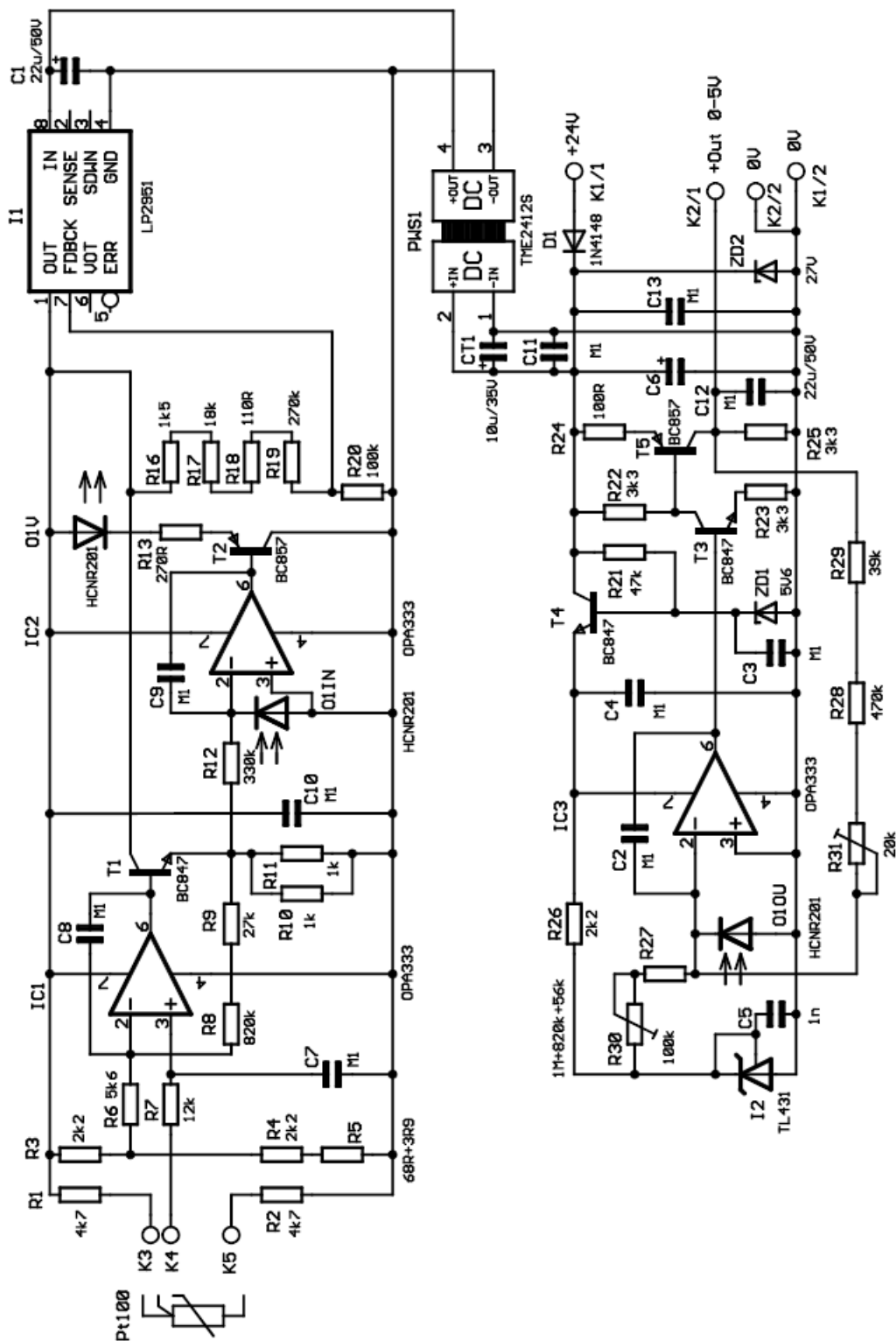
$$R_{27} = 1 \text{ M}\Omega + 820 \text{ k}\Omega + 56 \text{ k}\Omega \quad (27)$$

Napájení galvanicky oddělené vstupní části je zajištěno pomocí DC/DC měniče TME2412S firmy TracoPower [32]. Jedná se o DC/DC měnič, který je napájen 24 V DC, a na výstupu je k dispozici napětí 12 V DC. Obě napětí jsou oddělena na elektrickou pevnost 1000 V RMS.

Napájení výstupního operačního zesilovače zajišťuje tranzistor $T4$, který je řízen Zenerovou diodou $ZD1$ s hodnotou 5,6 V. Celý převodník je chráněn proti nadměrnému zvýšení napájecího napětí Zenerovou diodou $ZD2$ o hodnotě 27 V a proti přepólování diodou $D1$.

Trimrem R_{31} se nastavuje zesílení převodníku, tj. horní hranice výstupního rozsahu, trimrem R_{30} nula při počátku rozsahu. Protože nastavení nulového výstupního napětí v počáteční hodnotě zadaného vstupního teplotního rozsahu je téměř nemožné, spodní hranici nastavujeme při 0,1 hodnoty zadaného vstupního teplotního rozsahu jako 0,1 maxima výstupního rozsahu. Oba trimry jsou na sobě závislé, proto musíme nastavovat obě hodnoty opakovaně. Na obr.32 je navržené

zapojení bez linearizace. Převodník bez linearizace byl změřen, viz tab.2 v příloze A. Průběh výstupního napětí a odchylky od linearity jsou znázorněny v grafu na obr.34 a obr.35 v příloze A.



Obr. 32: Schéma zapojení převodníku bez linearizace

5.3 NÁVRH LINEARIZACE

Při měření pomocí měřicího můstku a při jeho napěťovém napájení dochází při daném měření k chybě nelinearity. Tuto chybu můžeme určit jako poměr odporů při počáteční a konečné hodnotě:

$$\Delta R_{m1} = \frac{4700 + 4700 + 175,84}{4700 + 4700 + 80,307} = 1,01008 \quad (28)$$

Další nelinearita je dána průběhem napětí na RTD čidle. Tu můžeme kompenzovat jako poměr očekávané hodnoty ke skutečné. Očekávanou hodnotu odporu čidla Pt 100 vypočteme dle rovnice (4). Při výpočtu zanedbáme třetí člen rovnice, který se uplatňuje při záporných teplotách:

$$\Delta R_{m2} = \frac{R_{pt250cek} - R_{pt-50}}{R_{pt250skut} - R_{pt-50}} = \frac{197,7005 - 80,307}{194,07425 - 80,307} = 1,03187 \quad (29)$$

Potom můžeme vypočítat hodnotu napájecího napětí při maximálním vstupním rozsahu:

$$U_{n200} = U_n \cdot \Delta R_{m1} \cdot \Delta R_{m2} = 4,8 \cdot 1,01008 \cdot 1,03187 = 5,0029 \text{ V} \quad (30)$$

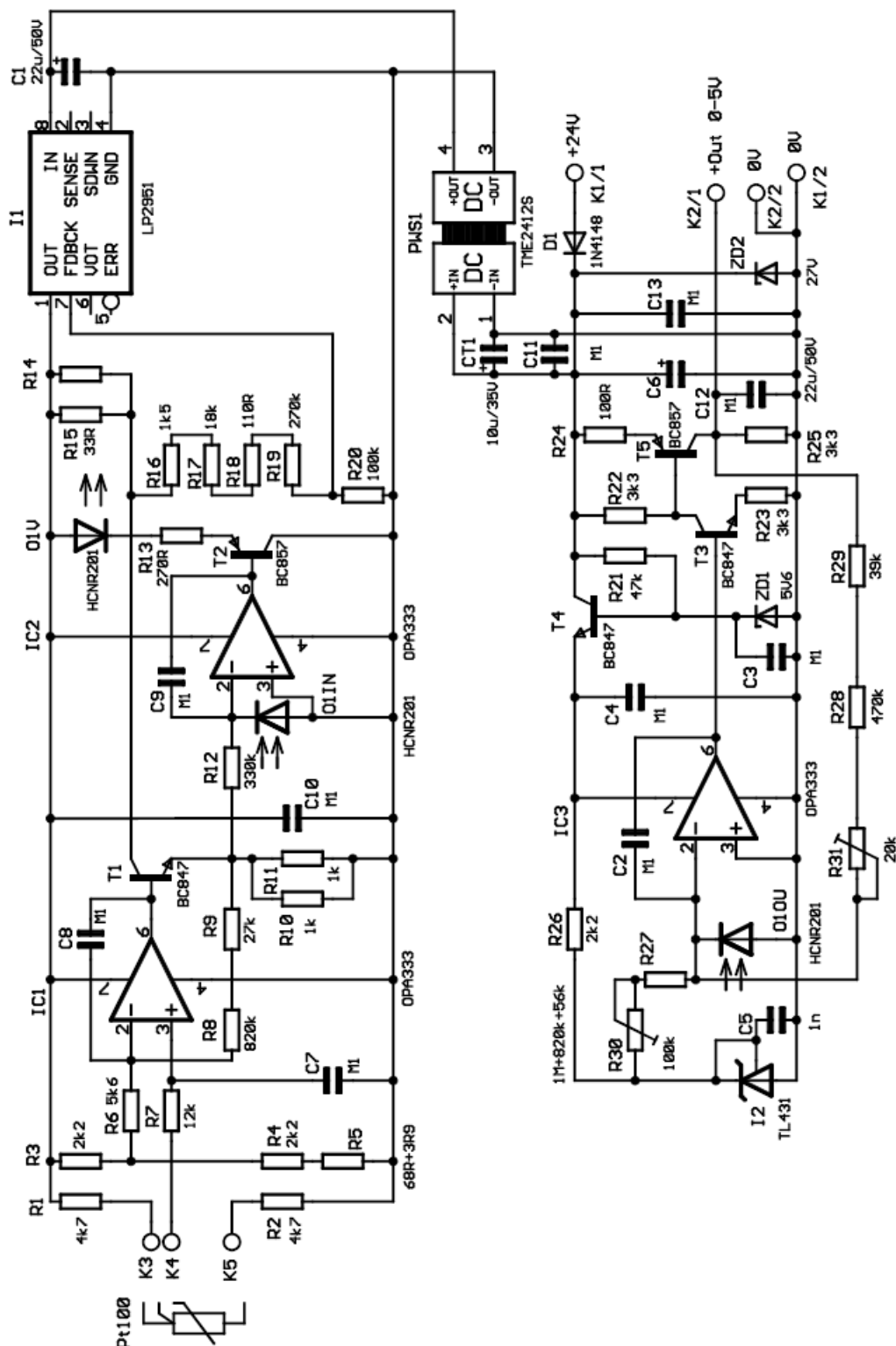
Z toho vyplývá, že potřebujeme, aby při výstupu $U_{out} = 5 \text{ V}$ bylo napájecí napětí vyšší o $U_{lin} = 0,2029 \text{ V}$. Při $U_{OZ200} = 3,4 \text{ V}$ prochází rezistorem $R_{I0} \parallel R_{I1}$ a kolektorem tranzistoru T_1 proud $I_{c200} = 6,8 \text{ mA}$. Při $U_{OZ-50} = 0,4 \text{ V}$ prochází rezistorem $R_{I0} \parallel R_{I1}$ a kolektorem tranzistoru T_1 proud $I_{c-50} = 0,8 \text{ mA}$.

Protože počáteční změřené napětí je $U_n = 4,8 \text{ V}$, požadované zvýšené napětí musí být $U_{lin} = 0,2029 \text{ V}$. To nám zajistí linearizační rezistor R_{15} zapojený v obvodu nastavení výstupního napětí LP2951:

$$R_{15} = \frac{U_{lin}}{I_{c200} + I_{c-50}} = \frac{0,2029}{6,8 \cdot 10^{-3} + 0,8 \cdot 10^{-3}} = 27 \Omega \quad (31)$$

Protože naše výpočty se opíraly o ideální hodnoty součástek a reálné hodnoty jsou mírně odlišné, byla hodnota rezistoru R_{15} stanovena na 33Ω . Zároveň se posunula horní hranice výstupního napětí U_{oz200} operačního zesilovače IC1, proto byla změněna hodnota rezistoru R_{29} na hodnotu $39 \text{ k}\Omega$.

Schéma navrženého převodníku je znázorněno na obr.33.



Obr. 33: Návrh převodníku s linearizací

6. MĚŘENÍ

Snímač Pt 100 byl simulován zařízením MicroCal 200. Převodník bez linearizace byl nastaven za pokojové teploty a hodnoty výstupu byly zaznamenány do tab.2 v příloze A. Potom byla zapojena linearizace, převodník byl znovu nastaven a hodnoty výstupu byly zaznamenány do tab.3 v příloze A. Poté bylo měření zopakováno za teploty $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Hodnoty byly zaznamenány do tab.4 a tab.5 v příloze A.

Použité měřicí přístroje:

- stabilizovaný zdroj BK0182 výr. č. 50085
- simulátor teplotního čidla MicroCal 200 Eurotron výr. č. 0025051
- voltmetr Hewlett Packard 34401A výr. č. US36021172

6.1 VÝSLEDKY MĚŘENÍ

Naměřené hodnoty byly zpracovány do tab.2, tab.3, tab.4, tab.5 v příloze A. Byla vypočtena odchylka od linearity, chyba měření a dosažená třída přesnosti převodníku. Z naměřených hodnot byly zpracovány grafy, které jsou uvedeny v příloze A.

7. ZÁVĚR

Měřením převodníku jsem zjistil, že zapojení pro kompenzaci nelinearizace čidla Pt 100 zlepšilo odchylku výstupního napětí od lineárního průběhu a lze vyrobit převodník lineární a s dostatečnou přesností pro průmyslové použití. Větší chyba linearity výstupu při okolní teplotě odlišné od $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ je způsobena použitím běžných rezistorů v měřicím můstku. Pro výrobu převodníku přesnějšího i při různých okolních teplotách by bylo nutné použít v měřicím můstku rezistory s malým teplotním součinitelem TK. Galvanické oddělení vstupu od výstupu se podařilo realizovat. Optočlen galvanicky odděluje měřicí signál na elektrickou pevnost 5000 V RMS. Napájení vstupní části od výstupní je odděleno DC/DC měničem na elektrickou pevnost 1000 V DC. Vstup převodníku je od výstupu galvanicky oddělen na 1000 V DC.

8. SEZNAM LITERATURY

- [1] KREIDL, Marcel: *Měření teploty - senzory a měřící obvody*, BEN, Praha, 2005
- [2] WEBER, D., NAU, M.: *Elektrische Temperaturmessung*, M. K. JUCHHEIM GMBH & CO
- [3] HARLINGEN S.R.O.: *Výroba teplotních čidel*,
<http://www.harlingen.cz/PDF/Nik15000.pdf>
- [4] INFINEON TECHNOLOGIES: *Datasheets*
http://www.infineon.convergy.de/upload/documents/techdoc/GF_42/kt_10_.pdf
- [5] NATIONAL SEMICONDUCTOR: *Datasheets*
<http://www.national.com/ds/LM/LM135.pdf>
- [6] HAYASHIDENKO CO.: *Manufactures of temperature senzore*,
<http://www.hayashidenko.co.jp/en/crz/index.htm>
- [7] ANALOG DEVICES: *Praktická příručka zpracování signálů ze senzorů*,
<http://www.analog.com/en/>
- [8] KMÍNEK, Miloš, KADLEC, Karel: *ÚPŘT VŠCHT PRAHA Měřící a řídicí technika*, <http://uprt.vscht.cz/ucebnice/mrt/F4/F4k43-tepl.htm#k433>
- [9] MAXIM: *Datasheets*,
<http://datasheets.maxim-ic.com/en/ds/MAX4236-MAX4237.pdf>
- [10] MAXIM: *Application notes*,
http://www.maxim-ic.com/appnotes.cfm/an_pk/4022
- [11] PS ELECTRONIC S.R.O.: *Prodej elektronických součástek*,
<http://www.pselectronic.cz>
- [12] MAXIM: *Application notes*,
http://www.maxim-ic.com/appnotes.cfm/an_pk/4022
- [13] MAXIM: *Application notes*,
http://www.maxim-ic.com/appnotes.cfm/an_pk/270
- [14] MAXIM: *Datasheets*, <http://datasheets.maxim-ic.com/en/ds/MAX1452.pdf>
- [15] MAXIM: *Datasheets*, <http://datasheets.maxim-ic.com/en/ds/MAX197.pdf>

- [16] GM ELECTRONIC S.R.O.: *Prodej elektronických součástek*,
<http://www.gme.cz/>
- [17] BURR-BROWN: *Datasheets*, <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/xtr105.pdf>
- [18] BURR-BROWN: *Application notes*,
<http://focus.ti.com/lit/an/sbfa007/sbfa007.pdf>
- [19] RAWET S.R.O.: *Výrobce galvanických oddělovačů, převodníků teploty, proudu, napětí*, <http://www.rawet.cz/>
- [20] NATIONAL INSTRUMENTS: *Software and education*,
ftp://ftp.ni.com/pub/devzone/pdf/tut_5358.pdf
- [21] TEXAS INSTRUMENTS: *Datasheets*,
<http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/iso721.pdf>
- [22] FARNELL: *Prodej elektronických součástek*, <http://cz.farnell.com/>
- [23] ANALOG DEVICES, INC: *Datasheets*,
http://www.analog.com/UploadedFiles/Data_Sheets/AD202_204.pdf
- [24] ANALOG DEVICES, INC: *Datasheets*,
http://www.analog.com/UploadedFiles/Data_Sheets/AD210.pdf
- [25] BURR-BROWN: *Datasheets*, <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/iso130.pdf>
- [26] BURR-BROWN: *Datasheets*, <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/iso107.pdf>
- [27] SPOERLE: *Distributor of electronic components*, <http://www.spoerle.com/en>
- [28] BURR-BROWN: *Datasheets*, <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/iso100.pdf>
- [29] CLARE, INC: *Datasheets*,
[http://www.clare.com/home/pdfs.nsf/www/LOC110.pdf/\\$file/LOC110.pdf](http://www.clare.com/home/pdfs.nsf/www/LOC110.pdf/$file/LOC110.pdf)
- [30] VISHAY: *Datasheets*, <http://www.vishay.com/docs/83622/83622.pdf>
- [31] AVAGO TECHNOLOGIES: *Datasheets*,
http://www.avagotech.com/products/optocouplers_-_plastic/plastic_high_linearity_analog_optocoupler/hcnr201/
- [32] TRACOPOWER: *Datasheets*,
http://dsb.tracopower.com/upload/DSBUserFile/CPN_Tracopower/0_tme.pdf
- [33] BURR-BROWN: *Datasheets*, <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/opa333.pdf>
- [34] NATIONAL SEMICONDUCTOR: *Datasheets*,
<http://cache.national.com/ds/LP/LP2950.pdf>

[35] TEXAS INSTRUMENTS: *Datasheets*,
<http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/tl431.pdf>

PŘÍLOHA A

A.1: TABULKY NAMĚŘENÝCH HODNOT

Tab. 2: Naměřené hodnoty při teplotě +20 °C bez zapojení linearizace

Simulovaná vstupní teplota t [°C]	Výstupní napětí U [V]	Odchylka od linearity Δ_U [V]	Relativní chyba měření δ_U [%]	Dosažená třída přesnosti δ_{TP} [%]
-50	0,0002	0,0002	0,0000	0,0040
-40	0,2006	0,0006	0,3000	0,0120
-30	0,4093	0,0093	2,3250	0,1860
-20	0,6180	0,0180	3,0000	0,3600
-10	0,8250	0,0250	3,1250	0,5000
0	1,0317	0,0317	3,1700	0,6340
10	1,2373	0,0373	3,1083	0,7460
20	1,4427	0,0427	3,0500	0,8540
30	1,6468	0,0468	2,9250	0,9360
40	1,8505	0,0505	2,8056	1,0100
50	2,0528	0,0528	2,6400	1,0560
60	2,2553	0,0553	2,5136	1,1060
70	2,4563	0,0563	2,3458	1,1260
80	2,6568	0,0568	2,1846	1,1360
90	2,8564	0,0564	2,0143	1,1280
100	3,0555	0,0555	1,8500	1,1100
110	3,2534	0,0534	1,6688	1,0680
120	3,4509	0,0509	1,4971	1,0180
130	3,6474	0,0474	1,3167	0,9480
140	3,8433	0,0433	1,1395	0,8660
150	4,0383	0,0383	0,9575	0,7660
160	4,2327	0,0327	0,7786	0,6540
170	4,4263	0,0263	0,5977	0,5260
180	4,6189	0,0189	0,4109	0,3780
190	4,8109	0,0109	0,2271	0,2180
200	5,0010	0,0010	0,0200	0,0200

Příklad výpočtu pro hodnotu 0 °C v tabulce 2:

$$\Delta_U = U_M - U_P = 1,0317 - 1,000 = 0,0317 \text{ V} \quad (32)$$

$$\delta_U = \frac{\Delta_U}{U_p} \cdot 100 = \frac{0,0317}{1,000} \cdot 100 = 3,17 \% \quad (33)$$

$$\delta_{TP} = \frac{|\Delta_U|}{X_R} \cdot 100 = \frac{|0,0317|}{5} \cdot 100 = 0,634 \% \quad (34)$$

Tab. 3: Naměřené hodnoty při teplotě +20 °C

Simulovaná vstupní teplota t [°C]	Výstupní napětí U [V]	Odchylka od linearity Δ_U [V]	Relativní chyba měření δ_U [%]	Dosažená třída přesnosti δ_{TP} [%]
-50	0,0005	0,0005	0,0000	0,0100
-40	0,1983	-0,0017	-0,8500	0,0340
-30	0,3986	-0,0014	-0,3500	0,0280
-20	0,5996	-0,0004	-0,0667	0,0080
-10	0,8001	0,0001	0,0125	0,0020
0	1,0009	0,0009	0,0900	0,0180
10	1,2013	0,0013	0,1083	0,0260
20	1,4022	0,0022	0,1571	0,0440
30	1,6023	0,0023	0,1437	0,0460
40	1,8030	0,0030	0,1667	0,0600
50	2,0033	0,0033	0,1650	0,0660
60	2,2036	0,0036	0,1636	0,0720
70	2,4038	0,0038	0,1583	0,0760
80	2,6040	0,0040	0,1538	0,0800
90	2,8039	0,0039	0,1393	0,0780
100	3,0040	0,0040	0,1333	0,0800
110	3,2039	0,0039	0,1219	0,0780
120	3,4039	0,0039	0,1147	0,0780
130	3,6037	0,0037	0,1028	0,0740
140	3,8033	0,0033	0,0868	0,0660
150	4,0027	0,0027	0,0675	0,0540
160	4,2021	0,0021	0,0500	0,0420
170	4,4012	0,0012	0,0273	0,0240
180	4,6001	0,0001	0,0022	0,0020
190	4,7992	-0,0008	-0,0167	0,0160
200	4,9980	-0,0020	-0,0400	0,0400

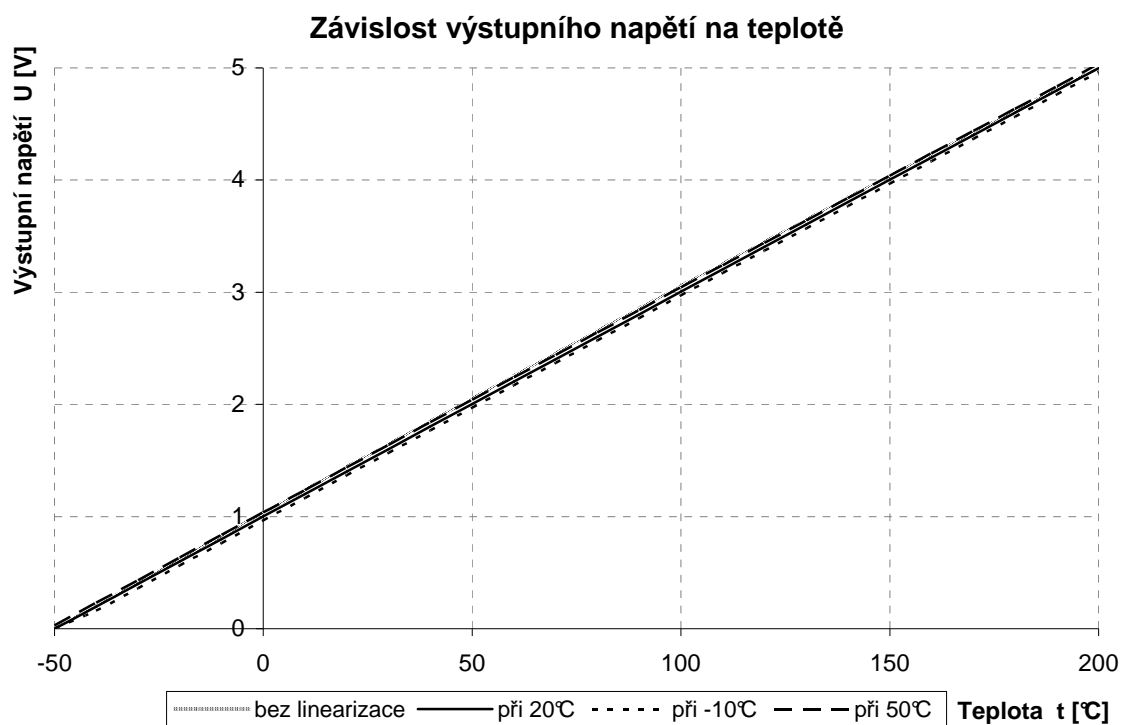
Tab. 4: Naměřené hodnoty při teplotě -10 °C

Simulovaná vstupní teplota t [°C]	Výstupní napětí U [V]	Odchylka od linearity Δ_U [V]	Relativní chyba měření δ_U [%]	Dosažená třída přesnosti δ_{TP} [%]
-50	0,0005	0,0005	0,0000	0,0100
-40	0,1590	-0,0410	-20,5000	0,8200
-30	0,3600	-0,0400	-10,0000	0,8000
-20	0,5617	-0,0383	-6,3833	0,7660
-10	0,7626	-0,0374	-4,6750	0,7480
0	0,9639	-0,0361	-3,6100	0,7220
10	1,1648	-0,0352	-2,9333	0,7040
20	1,3661	-0,0339	-2,4214	0,6780
30	1,5668	-0,0332	-2,0750	0,6640
40	1,7675	-0,0325	-1,8056	0,6500
50	1,9680	-0,0320	-1,6000	0,6400
60	2,1689	-0,0311	-1,4136	0,6220
70	2,3690	-0,0310	-1,2917	0,6200
80	2,5695	-0,0305	-1,1731	0,6100
90	2,7695	-0,0305	-1,0893	0,6100
100	2,9699	-0,0301	-1,0033	0,6020
110	3,1694	-0,0306	-0,9563	0,6120
120	3,3693	-0,0307	-0,9029	0,6140
130	3,5686	-0,0314	-0,8722	0,6280
140	3,7681	-0,0319	-0,8395	0,6380
150	3,9675	-0,0325	-0,8125	0,6500
160	4,1666	-0,0334	-0,7952	0,6680
170	4,3655	-0,0345	-0,7841	0,6900
180	4,5642	-0,0358	-0,7783	0,7160
190	4,7632	-0,0368	-0,7667	0,7360
200	4,9616	-0,0384	-0,7680	0,7680

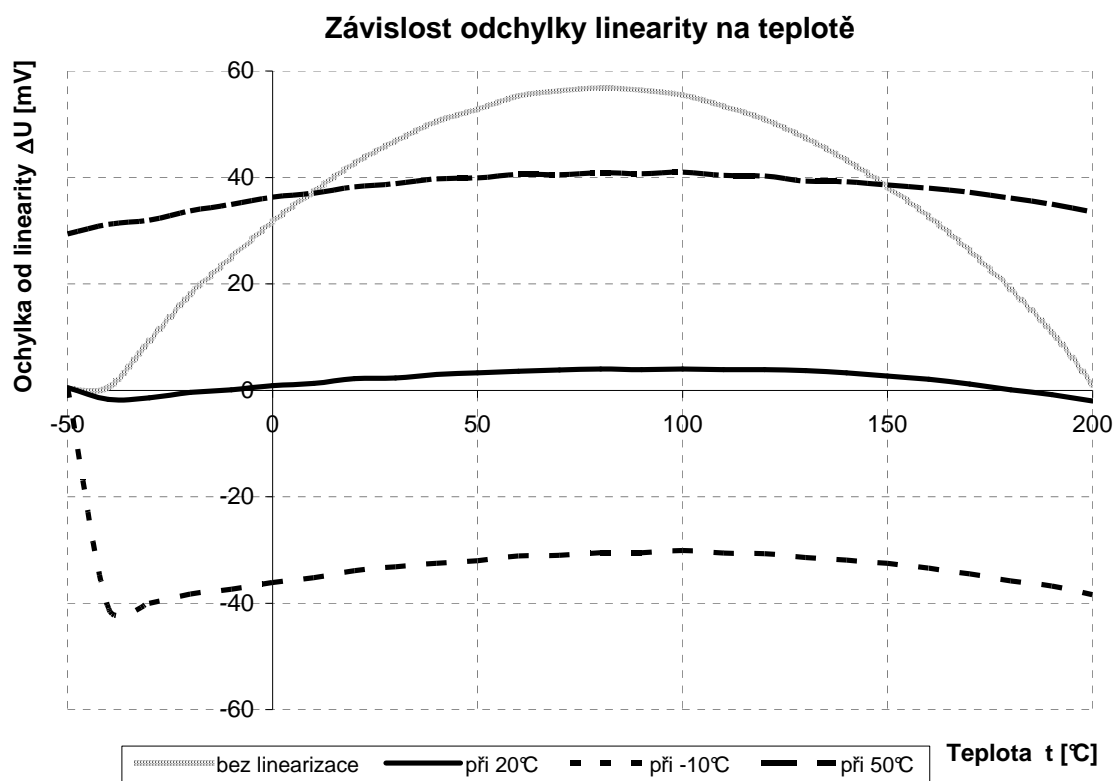
Tab. 5: Naměřené hodnoty při teplotě +50 °C

Simulovaná vstupní teplota t [°C]	Výstupní napětí U [V]	Odchylka od linearity Δ_U [V]	Relativní chyba měření δ_U [%]	Dosažená třída přesnosti δ_{TP} [%]
-50	0,0294	0,0294	0,0000	0,5880
-40	0,2312	0,0312	15,6000	0,6240
-30	0,4320	0,0320	8,0000	0,6400
-20	0,6337	0,0337	5,6167	0,6740
-10	0,8349	0,0349	4,3625	0,6980
0	1,0363	0,0363	3,6300	0,7260
10	1,2370	0,0370	3,0833	0,7400
20	1,4382	0,0382	2,7286	0,7640
30	1,6388	0,0388	2,4250	0,7760
40	1,8397	0,0397	2,2056	0,7940
50	2,0399	0,0399	1,9950	0,7980
60	2,2406	0,0406	1,8455	0,8120
70	2,4405	0,0405	1,6875	0,8100
80	2,6409	0,0409	1,5731	0,8180
90	2,8407	0,0407	1,4536	0,8140
100	3,0410	0,0410	1,3667	0,8200
110	3,2404	0,0404	1,2625	0,8080
120	3,4403	0,0403	1,1853	0,8060
130	3,6393	0,0393	1,0917	0,7860
140	3,8392	0,0392	1,0316	0,7840
150	4,0386	0,0386	0,9650	0,7720
160	4,2380	0,0380	0,9048	0,7600
170	4,4372	0,0372	0,8455	0,7440
180	4,6361	0,0361	0,7848	0,7220
190	4,8350	0,0350	0,7292	0,7000
200	5,0335	0,0335	0,6700	0,6700

A.2: GRAF NAMĚŘENÝCH HODNOT



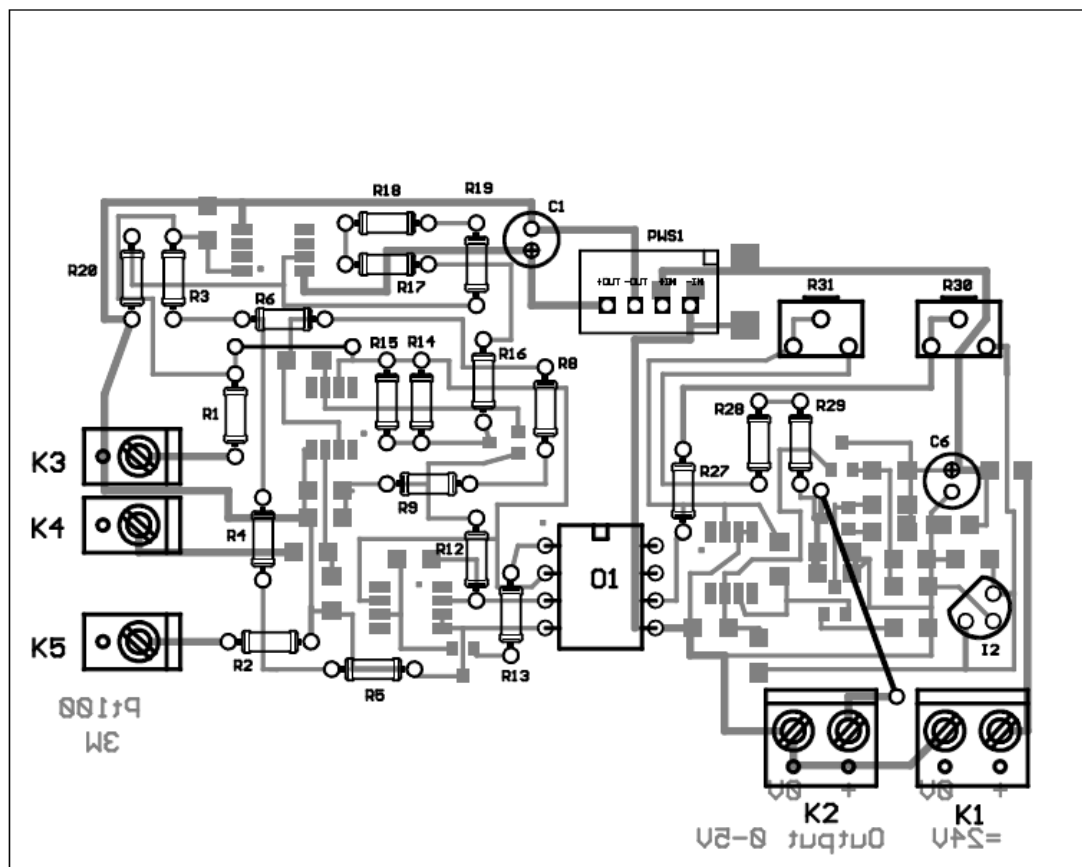
Obr. 34: Graf závislosti výstupního napětí na teplotě



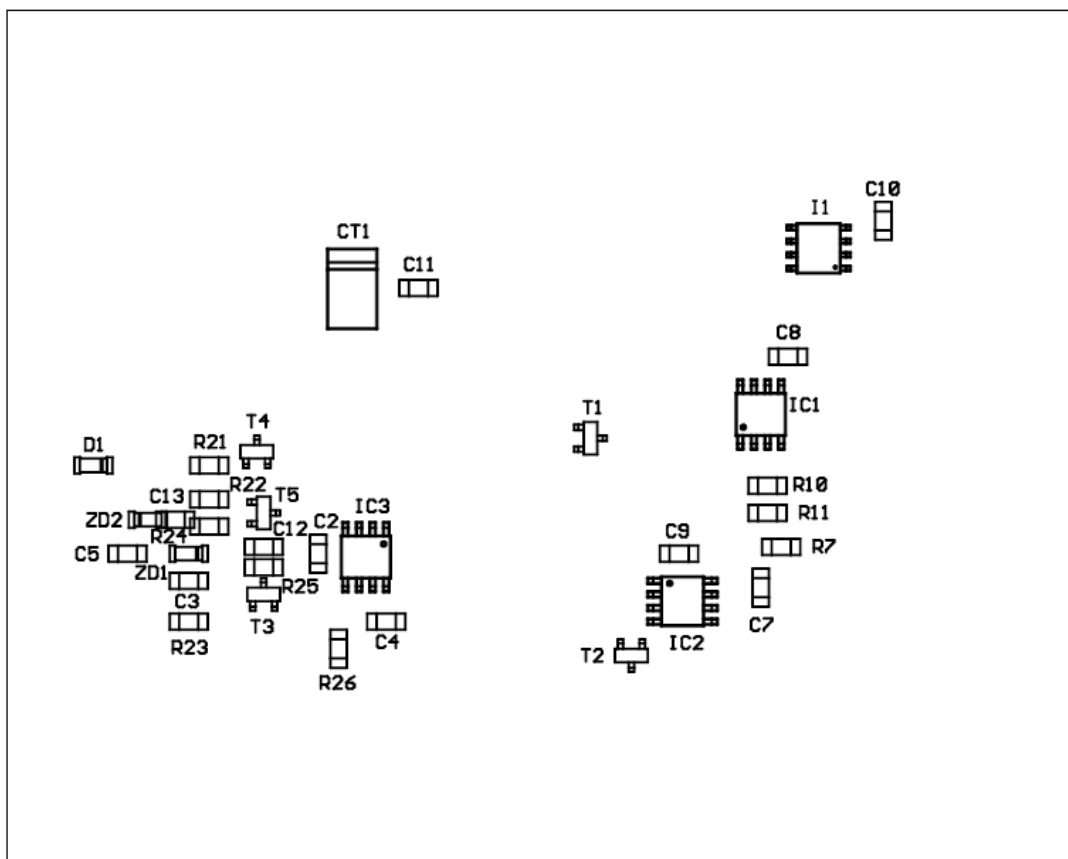
Obr. 35: Graf závislosti odchylky linearity na teplotě

PŘÍLOHA B

B.1: DOKUMENTACE K PLOŠNÉMU SPOJI PŘEVODNÍKU



Obr. 36: Rozmístění součástek na plošném spoji, strana součástek



Obr. 37: Rozmístění součástek na plošném spoji, strana spojů

Tab. 6: Rozpiska součástek

Označení	Název	Typ	Pouzdro	Počet
C1	elyt kondenzátor	22u/50V	SKR5	1
C2	kondenzátor	M1	SMD 1206	1
C3	kondenzátor	M1	SMD 1206	1
C4	kondenzátor	M1	SMD 1206	1
C5	kondenzátor	1n	SMD 1206	1
C6	elyt kondenzátor	22u/50V	SKR5	1
C7	kondenzátor	M1	SMD 1206	1
C8	kondenzátor	M1	SMD 1206	1
C9	kondenzátor	M1	SMD 1206	1
C10	kondenzátor	M1	SMD 1206	1
C11	kondenzátor	M1	SMD 1206	1
C12	kondenzátor	M1	SMD 1206	1
C13	kondenzátor	M1	SMD 1206	1
CT1	tantal. kondenzátor	10u/35V	CTS-D SMD	1

D1	dioda	1N4148	SOD80	1
I1	stabilizátor napětí	LP2951	SO08	1
I2	napěťová reference	TL431	TO92	1
IC1	operační zesilovač	OPA333	SO8	1
IC2	operační zesilovač	OPA333	SO8	1
IC3	operační zesilovač	OPA333	SO8	1
K1	konektor	ARK120/2	ARK120/2	1
K2	konektor	ARK120/2	ARK120/2	1
K3	konektor	ARK120/1	ARK120/1	1
K4	konektor	ARK120/1	ARK120/1	1
K5	konektor	ARK120/1	ARK120/1	1
O1	optočlen	HCNR201	DIP04	1
PWS1	DC/DC měnič	TME2412S	SIP	1
R1	rezistor	4k7	RR	1
R2	rezistor	4k7	RR	1
R3	rezistor	2k2	RR	1
R4	rezistor	2k2	RR	1
R5	rezistor	68R+3R9	RR	1
R6	rezistor	5k6	RR	1
R7	rezistor	12k	SMD 1206	1
R8	rezistor	820k	RR	1
R9	rezistor	27k	RR	1
R10	rezistor	1k	SMD 1206	1
R11	rezistor	1k	SMD 1206	1
R12	rezistor	330k	RR	1
R13	rezistor	270R	RR	1
R14	rezistor	není	RR	0
R15	rezistor	33R	RR	1
R16	rezistor	1k5	RR	1
R17	rezistor	18k	RR	1
R18	rezistor	110R	RR	1
R19	rezistor	270k	RR	1
R20	rezistor	100k	RR	1
R21	rezistor	47k	SMD 1206	1
R22	rezistor	3k3	SMD 1206	1
R23	rezistor	3k3	SMD 1206	1
R24	rezistor	100R	SMD 1206	1
R25	rezistor	3k3	SMD 1206	1
R26	rezistor	2k2	SMD 1206	1
R27	rezistor	1M+820k+56k	RR	1
R28	rezistor	470k	RR	1
R29	rezistor	39k	RR	1
R30	trimr	100k	T73XX	1
R31	trimr	20k	T73XX	1
T1	tranzistor	BC847	SOT23	1

T2	tranzistor	BC857	SOT23	1
T3	tranzistor	BC847	SOT23	1
T4	tranzistor	BC847	SOT23	1
T5	tranzistor	BC857	SOT23	1
ZD1	Zenerova dioda	BZV55C5V6	SOD80	1
ZD2	Zenerova dioda	BZV55C27V	SOD80	1

PŘÍLOHA C

C.1: POZNÁMKY

Elektrická schémata uvedená v bakalářské práci byla nakreslena pomocí programu ProfiCAD 4.6.4 (www.proficad.cz). Elektrické schéma zapojení převodníku a návrh plošného spoje bylo provedeno pomocí programu EAGLE Layout Editor 4.11 (CadSoft). Ceny součástek uvedené v bakalářské práci jsou aktuální pro období květen 2008.